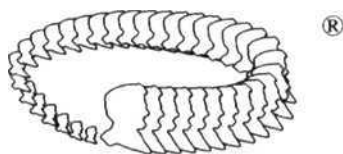


С. В. Плетнев

**МАГНИТНОЕ ПОЛЕ: СВОЙСТВА, ПРИМЕНЕНИЕ**



**S. V. Pletneff**

# THE MAGNETIC FIELD: PROPERTIES, APPLICATION

The scientific and educational  
methodical handbook

St. Petersburg  
"Humanistica"  
2004

С. В. Плетнев

# **МАГНИТНОЕ ПОЛЕ: СВОЙСТВА, ПРИМЕНЕНИЕ**

Научное и учебно-методическое  
справочное пособие

Санкт-Петербург  
"Гуманистика"

2004

УДК 628.4+535.23

**Плетнев С. В. Магнитное поле, свойства, применение:** Научное и учебно-методическое справочное пособие. — СПб.: Гуманистика, 2004.— 624 с.

Книга посвящена одному из уникальных физических явлений — магнетизму. В ней рассмотрены такие вопросы как история магнетизма, основы теории магнитного поля, физические основы и методы получения магнитного поля, магниты и магнитные свойства вещества, перспективные материалы для постоянных магнитов, применения магнитов и магнитного поля в технике и технологиях, применение магнитов и магнитного поля в современной медицине. Данное научное и учебно-методическое справочное пособие может быть полезно студентам, аспирантам и специалистам, занимающимся изучением и применением магнитного поля и магнитов в различных отраслях науки и техники.

*Рецензент*

*Разумов А.Н.*, Заслуженный деятель науки РФ, академик РАМН, д-р мед. наук, профессор, директор Всероссийского научного центра восстановительной медицины и курортологии

ISBN 5-86050-198-6



## ВВЕДЕНИЕ

Развитие современной цивилизации трудно представить без широкого использования магнитных материалов и магнитного поля. Особенно значительный эффект использования магнитных полей и материалов достигнут в науке. Создание и использование методов ядерного магнитного резонанса, электронно-парамагнитного резонанса, использование магнитного поля для удержания плазмы. Использование в технике различных магнитных сепараторов, магнитных подъемных устройств, магнитных методов неразрушающего контроля качества изделий. Эффективное применение магнитного поля в медицине — для терапии, диагностики, оздоровления и т.д. Вот неполный перечень применений магнитного поля. А впереди еще более потрясающие открытия магнитных свойств, новых магнитных материалов и уникальных применений магнитного поля в науке, в промышленности, на транспорте, в медицине и т.д.

Вплоть до первой половины нашего века развивались теоретические представления о магнетизме и проводились экспериментальные исследования магнитоупорядоченных веществ с коллинеарным расположением магнитных моментов. К ним относятся прежде всего ферромагнетики с одинаковой параллельной ориентацией магнитных моментов ниже температуры Кюри. Это такие классические ферромагнетики, как железо, кобальт, никель и их многочисленные сплавы, по которым и были выполнены основные исследования по магнетизму. Затем было обнаружено, что наряду с коллинеарными ферромагнетиками существуют такие, где магнитные моменты подрешеток атомов антипараллельны либо образуют небольшой угол. Важный прорыв в области исследования магнитного упорядочения стал возможен после появления нейтронографического метода. Благодаря тому что нейтрон обладает магнитным моментом, дифракция нейтронов позволила по магнитным дифракционным рефлексам идентифицировать сложные спиральные и периодические магнитные структуры в магнитоупорядоченных веществах. В настоящее время исследуется магнитное упорядочение различных сплавов, металлических и полупроводниковых соединений, изоляторов, кристаллических и аморфных веществ. Для объяснения необычных магнитных структур некоторых магнетиков необходимо дальнейшее развитие теории магнетизма.

Новые магнитные материалы все шире внедряются в технику. Они обладают рекордными магнитными параметрами или оптимальным сочетанием магнитных и других физических характеристик. В то же время классические магнитные материалы не могут обеспечить потребности быстро развивающейся техники.

В современной учебной литературе (школьных и вузовских учебниках и учебных пособиях) рассматриваются в качестве сильномагнитных веществ,

как правило, только ферромагнетики. Все это сужает представления о магнетизме.

В предлагаемой книге сделана попытка систематизировать современные данные о магнитных материалах и их свойствах, магнитном поле и его применении. При этом широко использованы современные публикации, размещенные в различных изданиях, Интернете, без претензии на авторство этих работ.

Автор выражает благодарность своему научному руководителю Потапову Анатолию Ивановичу - - Заслуженному деятелю науки РФ, д-ру техн. наук, профессору, а также рецензенту данной книги Разумову Александру Николаевичу, Заслуженному деятелю науки РФ, академику РАМН, д-ру мед. наук, профессору, директору Всероссийского научного центра восстановительной медицины и курортологии.

## Глава 1.

# ИСТОРИЯ МАГНЕТИЗМА

### Геркулесов камень

Природные магниты, это кусочки магнитного железняка - - магнетита (химический состав 31%  $FeO$  и 69%  $Fe_2O_3$ ), не везде назывались магнитами в разных странах их называли по-разному: китайцы называли его чу-ши; греки - адамас и каламита, геркулесов камень; французы - айман; индусы - тхумбака; египтяне — кость Ора, испанцы — пьедрамант; немцы — магнесс и зигельштейн; англичане — лоудстоун.

Добрая половина этих названий переводится как любящий, любовник. Так поэтическим языком древних описано свойство магнетита притягивать, "любить" железо.

...Самые старые "документальные" свидетельства о знакомстве людей с магнитами пришли к нам из Центральной Америки. На городской площади гватемальского городка Демокрасия стоит дюжина древних фигур, найденных при раскопках городища ольмеков. "Толстые мальчики", как их называли за округлость и массивность, — символы сытости, благополучия, плодovitости. Эти скульптуры более трех тысяч лет назад высечены из глыб магнитной породы. Интересно, что магнитные силовые линии как бы выходят из живота "толстяков"! Кстати, кроме "толстых мальчиков", древние ольмеки умели высекать фигуры морских черепах с намагниченной головой, связывая, возможно, способность черепах находить курс в открытом море со свойствами магнита ориентироваться в магнитном поле Земли.

Есть намеки, правда, весьма туманные, на то, что в седой древности знали о магнитах и в Азии, в Китае. Много лет назад китайский фольклорист Су Матзен собрал библиотеку старинных летописей. Вот сведения из этих летописей, посвященные магнитам:

...Идут караваны по бескрайним гобийским пескам. Направо, налево - унылые желтые барханы. Солнце скрыто желтой пеленой пыли. Далекий путь из императорских пагод на берегах Янцзы до минаретов кушанских царств. Трудно пришлось бы караванщикам, если бы не было в караване белого верблюда. Белого верблюда с его бесценным грузом. Бесценным, хотя это не золото, не жемчуг и не слоновая кость. Защищенный деревянной резной клеткой, между горбами белого верблюда совершал свой путь через пустыню глиняный сосуд, в котором на пробке плавал в воде небольшой продолговатый кусок намагниченного железа. Края сосуда были выкрашены в четыре цвета (В.И.Ожогин считает, что, скорее всего, цвета были нанесены на саму пробку). Красный

обозначал юг, черный — север, зеленый — восток и белый — запад. Глиняный сосуд с кусочком железа в нем был примитивным древним компасом, указывавшим караванщикам путь в бескрайних песках...

...Император Чеу Кун решил отблагодарить послов далекого Юе-Чана (Вьетнама) за белых фазанов - - доставленные ими символы дружбы - - и подарил им пять колесниц с фигурками, всегда указывавшими на юг. Послы отправились домой, достигли берега моря, миновали много неведомых городов и год спустя прибыли на родину...

Возможно, в этих легендах, относящихся к 1100г. до н. э., содержится первое упоминание о компасе, т.е. полезно использованном магните. Но не исключено, однако, что в процессе многократного перевода и неизбежной реконструкции текстов их технический смысл был искажен. Известный историк физики Я.Б.Дорфман считал, например, что "югоуказатели" на повозках на самом деле были примитивными устройствами для выдерживания колесами любого наперед заданного, в том числе и южного, направления. Ясно, что в этом случае "юго-указатели" не имеют никакого отношения ни к магнетизму, ни к магнитам.

В китайских летописях встречаются описания магнитных ворот, через которые не мог пройти недоброжелатель с оружием, а также магнитных мостовых и прочих применений волшебного камня чу-ши, попросту магнитного железняка.

В другой легенде рассказывается о военной победе императора Хуанг-Ти, одержанной более трех тысяч лет назад. Этой победой он был обязан своим мастерам, изготовившим повозки, на которых были установлены фигурки человека с рукой, вытянутой вперед. Фигурки могли вращаться, но вытянутая рука всегда указывала на юг.

С помощью таких повозок Хуанг-Ти смог в густом тумане напасть на врага с тыла и разгромить его.

Опираясь на сведения, приведенные в древнейших китайских энциклопедиях, можно высказать догадку о том, что между 300 и 400гг. до н. э. магнитная стрелка использовалась на кораблях.

Если же перейти от легенд к твердо установленным фактам, то компас значительно "помолодеет". Так, в музее хранится китайский компас "лишь" тысячелетней давности, напоминающий по форме нашу хохломскую ложку.

Из других древнейших упоминаний о магнитах следует выделить рассказ о часовне Магомета с магнитным сводом, под которым парит железный сундук с прахом пророка. Однако европейским путешественникам ни разу не удалось увидеть этой диковины, даже тем, кто, прикинувшись правоверным и обманув бдительность мулл, проник в храм Каабы.

Гораздо более определенно можно ссылаться на европейские источники. О магните в той или иной связи писали до нашей эры Пифагор, Гиппократ, Платон, Эпикур, Аристотель и Лукреций, потом Плиний, Плутарх, Гален и Птолемей.

Название "магнит", как утверждает Платон, дано магнетиту Еврипидом, называвшим его в своих драмах "камнем из Магнезии". По другой, значительно более красивой и известной, но менее правдоподобной притче Плиния (заимствованной им у Никандра) название дано в честь сказочного волопаса Магна, гвозди от сандалий и железная папка которого прилипали к неведомым камням.

По-видимому, слово "магнит" действительно происходит от названия провинции Магнезия (в Греции), жителей которой звали магнетами. Так утверждал Тит Лукреций Кар в своей поэме "О природе вещей". Русский путешественник В.А.Теплов, посетивший Магнезию в 80-х годах прошлого века, утверждал, что гора известна частыми ударами в нее молний (этим же славилась и гора Магнитная на Урале, почти целиком состоящая из магнетита). Наиболее распространенная из сказок о чудодейственной силе магнита, вошедшая в сказки "Тысяча и одной ночи", заимствована у Плиния, который утверждал, что в Эфиопии существует гора Зимир, вытягивающая из кораблей все гвозди и железные части.

И в Азии, и в Европе, по-видимому, давно использовали магнетизм Земли, применяя для ориентирования магнитный камень, подвешенный на нити или установленный на дощечке, плавающей на спокойной поверхности воды. В старом французском романе "О розе" магнит описывался под названием "маринетта", из чего можно сделать вывод об использовании его на морских судах.

Эти обстоятельства не смогли помешать итальянцам построить в Неаполе памятник Флавио Джойя, жителю города Амальфи, который якобы изобрел магнитный компас в 1302г., и отпраздновать в 1902г. шестисотлетие открытия. Не за легенду говорят хотя бы упоминания о компасе монаха из монастыря св. Альбана Александра Некэма в 1187г. и стихи поэта Гюйо Прованского, написанные в 1206г.

Но красивая легенда о Флавио Джойя, "изобретателе компаса", до сих пор живет у итальянцев.

...Давным-давно, когда город Амальфи стоял, как и Венеция, на море, жил в нем Флавио Джойя, ювелир и инкрустатор. Он был беден и весел, а кроме того, любил Анджелу, дочь богатого рыбака Доменико.

Рыбак Доменико не хотел, чтобы его дочь вышла замуж за "сухопутного" Джойя, и поставил перед Флавио тяжелое условие -- научиться плавать по прямой линии в тумане и в ночи. Ясно, что это условие невыполнимо: попробуйте погрести пять минут, закрыв глаза — наверняка приплывете туда, откуда отплыли.

Но Флавио был не из тех, кто унывает. В работе для инкрустирования маленькими кусочками железа он использовал магнитный камень. Как-то Флавио заметил, что, если положить этот камень на кусочек пробки, плавающей в воде, он поворачивается всегда в одну сторону. Так, по легенде, Флавио изобрел компас.

Через месяц он женился на красавице Анджеле. Флавио получил Анджелу, рыбаки получили компас...

Этот поэтический рассказ, к сожалению, совершенно "рассыпается", если подойти к нему с позиций исторического анализа. Анатолий Коваленко, советский специалист по компасам, убедительно показал, что благодаря путанице и "испорченному телефону" имя секретаря папы Флавио Бьендо, рассказывавшего в 1450г. о том, что жители Амальфи знают о компасе, превратилось в имя ювелира Флавио Джойя - "изобретателя компаса".

Магнитная сила привлекала не только мореходов. Ею всерьез интересовались и древние строители.

Плиний писал, что александрийский архитектор Хинократ (или Тимохарес) начал делать свод храма Арсиной из магнитного камня, для того чтобы железная фигура Арсиной висела в воздухе; этот замысел не был, повидимому, осуществлен из-за смерти Хинократа и брата Арсиной, Птолемея, который, как выразились бы сейчас, "финансировал" это предприятие.

Многие историки церкви единодушно и независимо утверждают, что в александрийском храме Сераписа статуя бога Солнца могла, к изумлению молящихся, взлететь к потолку, увлекаемая силой большого магнита. А через тысячи лет идея "храма Арсиной" вновь обрела своих приверженцев: молодые авторы — наши современники — предложили проекты памятников с использованием магнитных сводов, напоминающих свод Хинократа.

Даже из этого краткого обзора видно, что магнит был хорошо известен древним. Мало того, магнитные свойства уже тогда использовались.

И все-таки... почему? Почему магнит — магнит?

Аристотель, толкуя мысли Фалеса в своем трактате о душе, писал: он (Фалес) почитал причиной всякого движения душу, и, следовательно, лишь благодаря ей магнит может сообщать движение железу.

Итак, душа. Еще Орфей пел, что "железо тянется к магниту, как невеста к жениху". Может быть, в магните живет душа злая? Может быть, магниты созданы злыми демонами на погибель людям и на пользу ворами? Ведь то, что обладает свойством отодвигать запоры и отпирать замки, наверняка создано ради воровства. Платон утверждал, что свойства магнита имеют божественное происхождение, и тем самым избежал многих раздумий и сомнений.

Он писал: например: "...Божественная сила магнита передается от железа к железу подобно тому, как вдохновение музы передается через поэта его рассказчику и слушателю". Объяснение эпикурейца Лукреция явно было убедительней, хотя с современных позиций наивно. Мы приводим ниже эту несколько затянутую цитату из Лукреция ввиду ее исключительной ценности. Ведь этим гекзаметрам уже более двух тысяч лет!

"Мне остается сказать, по какому закону природы  
То происходит, что камень притягивать может железо,  
Камень же этот по имени месторождения магнитом  
Назван был греками, так как он найден в пределах магнетов.  
Люди весьма удивляются камню такому. Он часто  
Цель представляет из звеньев, держащихся сами собою.

Можешь увидеть ты пять таких звеньев, порой даже больше.  
Распределенные рядом, качаясь от легкого ветра,  
Звенья такие свисают, одно под другим прилепившись.  
Звенья одно от другого всю силу и цепкость приемлют.  
Вот как здесь действует этого камня текучая сила...  
Прежде всего из магнита должны семена выделяться  
Множеством или же ток истекать, разбивая толчками  
Воздух, который везде между камнем лежит и железом,  
Только что станет пустым пространство меж ними, и много  
Места очистится там, как тотчас же, общею кучей  
Первоначала туда стремглав понесутся железа;  
Следом за тем кольцо устремляется всем своим телом.  
Вовсе не надо тебе удивляться, что ток из магнита  
Не в состоянии совсем на другие действовать вещи:  
Частью их тяжесть стоять заставляет, — как золото, — частью  
Пористы телом они, и поэтому ток устремляется  
Может свободно сквозь них, никуда не толкая при этом;  
К этому роду вещей мы дерево можем причислить.  
Среднее место меж тем и другим занимает железо...  
Вещи, в которых их ткань совпадает взаимно с другою.  
Так, что где выпуклость есть, у другой оказалась бы там же  
Впадина, — эта их связь и окажется самую тесной.  
Есть и такие еще, что крючками и петлями будто  
Держатся крепко, и этим друг с другом скрепляются вместе.  
Это скорее всего происходит в железе с магнитом..."

Про крючки и петли сказано, может быть, слишком конкретно. Однако каждому ясно, что древние отлично понимали главное. Кроме магнита есть нечто, его окружающее. Можно говорить о душе, об атмосфере, об истечениях или исторгаемых наружу семенах. Сейчас это называют магнитным полем. Именно оно тянет железо к магниту!

Великолепная картина, данная Лукрецием, поэтически перелагает тезис Эпикура: "Фигуры атомов и неделимых тел, истекающих из камня и из железа, так подходят друг к другу, что легко сцепляются между собой; итак, ударившись о твердые части камня и железа, а затем отскочив в середину, они одновременно и связываются друг с другом, и влекут железо".

Великий Платон, философ-идеалист, так комментировал механизм магнитных действий: "...ввиду того, что не бывает никакой пустоты, эти тела со всех сторон толкают друг друга, и когда они разделяются и соединяются, все, обменявшись местами, переходят на свое обычное место. Вероятно, те, кто произведет правильное исследование, придут в изумление от этих запутанных взаимоотношений".

Что и говорить, повествуя о "запутанных взаимоотношениях", Платон был удивительно дальновиден. Последующие открытия убедили ученых в том, что природа магнетизма гораздо сложнее, чем зацепления с помощью крючков и

зацепок. Механистических представлений древних оказалось недостаточно, чтобы справиться с описанием магнитных явлений. Даже сейчас, когда мы очень многое знаем о природе магнетизма и благодаря этим знаниям сумели создать ряд исключительно важных магнитных материалов, еще остаются, к сожалению, справедливыми слова великого Гильберта: "Скорбите и плачьте, ученые, по поводу того, что ни прежние перипатетики, ни сами вульгарные философы, ни Иоанн Костей, высмеивающий все это, не могли постичь этой столь благородной и замечательной природы".

Действительно, почему все же железо притягивает? В чем сущность магнитного притяжения? Вопрос этот волнует людей уже давно.

Тысячи лет назад кабирь (так называли бродячих фокусников Древней Греции) странствовали по своей земле и давали в тени олив удивительные представления. Одно из них всегда приковывало внимание обитателей окрестных селений. То, что делали кабирь, внушало благоговейное почтение к их тайному могуществу.

Несколько тяжелых железных колец висели, ничем не связанные между собой, одно под другим, не падая. Казалось, могущественный Зевс, сильный и невидимый, поддерживает ладонями на весу эти кольца.

Секрет кабирь заключался в том, что кольца эти были сделаны из "геркулесова камня", добывавшегося где-то в Маниссе.

Уникальная способность магнита притягивать железные предметы ассоциировалась в воображении древних с плотской любовью, и поэтому первые объяснения притягивающего действия этих камней были связаны с приписыванием магниту женского, а железу мужского начала. Иногда считали и наоборот. Это, конечно, несколько не меняло дела. Суть сводилась к тому, что любые "притяжения", в том числе и притяжение магнита, были механически приравнены одно другому. Стремление пылинок к потертому о шерсть янтарю, металлических колец — к магниту, одного человека — к другому считали явлениями одного порядка. В обширную за счет этого коллекцию "магнитов" попали многие, весьма странные с современной точки зрения экспонаты. Так, в свое время писали о "креагическом", или "мясном", магните, поскольку некоторые ученые видели, как куски мяса пристаю к губе.

Гильберт когда-то писал: "Пламя серы притягивает, так как оно похищает некоторые металлы благодаря своей способности проникать внутрь их. Так белая нефть привлекает пламя, так как она испускает и испаряет воспламеняющийся газ, почему она на некотором расстоянии и воспламеняется; таким же образом дым только что потушенной свечи воспринимает пламя от другого пламени: ведь огонь ползет к огню сквозь воспламеняющуюся среду..."

В семейство "магнитов" попали также: рыба-прилипала; морские моллюски, присосавшиеся к днищу корабля; камень сагдон, к которому якобы притягиваются деревья, причем с такой силой, что оторвать их можно только, обрубая сучья и ветви; камень катохит, притягивающий к себе мясо (как впоследствии выяснилось, этот камень "от его липкости и присущего ему клея" пристае к теплым рукам).



Воображением и наблюдательностью наших предков было образовано и семейство "антимангнитов", т.е. семейство существ и веществ, взаимно отталкивающихся. В это семейство попали и антипатичные друг другу люди; и пламя свечи, отталкивающееся от магнита; и масло, отталкивающее воду.

"...Плиний, выдающийся человек и лучший из тех, кто делал выписки (ведь он передал потомству не всегда и не преимущественно то, что он видел и открыл сам, а чужое), списал у других сказку, ставшую в новое время, благодаря частым пересказам, общеизвестной: в Индии, у реки Инда, есть две горы; природа одной, состоящей из магнита, такова, что она задерживает всякое железо; другая, состоящая из фемаеда, отталкивает железо. Так, если в обуви имеются железные гвозди, то нет возможности оторвать подошвы от одной из этих гор, а на другую нет возможности ступить". Альберт Великий пишет, что в его время был найден магнит, который одной своей стороной притягивал к себе железо, а другой, противоположной, отталкивал его, - указывал Гильберт, человек, на долю которого выпало разделить все эти явления "притяжения и отталкивания" на соответствующие категории и выделить из них лишь то, что непосредственно касается магнита. Гильберт отверг всякие рассуждения о фемаеде - веществе, отталкивающемся от железа. Может быть, это была ошибка Гильберта.

Сегодня хорошо известно, что есть материалы, которые магнитом отталкиваются. К их числу, например, принадлежит медь. Правда, это отталкивание очень слабое, но кто знает — не могли ли древние каким-то образом заметить его и создать свое учение о фемаеде — антимангите.

Сейчас такие вещества называют диамагнетиками.

Вещества, притягивающиеся к магниту, называют парамагнетиками и ферромагнетиками. Свойство притяжения в наибольшей степени присуще ферромагнетикам, и в первую очередь железу, никелю и кобальту.

Причиной магнитных свойств единодушно считают вращение заряженных электронов вокруг ядра атома и собственное вращение электрона вокруг оси (спин). Всякое движение заряда — это электрический ток, а каждый ток создает магнитное поле.

Магнитные свойства атомов, так же как и все их свойства, находят отражение в Периодической системе элементов Д.И.Менделеева. Изменению номера элемента в таблице Менделеева соответствует изменение структуры электронных оболочек атома. Структуры оболочек ферромагнитных атомов таковы, что все электроны, грубо говоря, вращаются в одну сторону, создавая сильный суммирующий магнитный момент. В неферромагнитных же атомах магнитные моменты электронов направлены в разные стороны, что приводит к их взаимной компенсации.

В немагнитном ферромагнетике магнитный момент тела в целом равен нулю. Это объясняется тем, что в ферромагнетиках все атомы делятся на группы — так называемые домены. Каждый из доменов, видимый невооруженным глазом, содержит миллиарды атомов, ориентированных в одном направлении, и, таким образом, имеет солидный суммарный магнитный момент.

Однако тело в целом магнитным моментом не обладает, поскольку домены в теле расположены хаотично.

Помещая тело в магнитное поле, мы способствуем тому, что все домены постепенно ориентируются в направлении внешнего магнитного поля и их магнитные свойства суммируются. Сняв внешнее магнитное поле, получим новый магнит — ферромагнитное тело, в котором все домены намагничены в одном направлении. Если мы хотим в течение длительного времени сохранить магнитные свойства "рукотворного магнита", нужно приложить усилия к тому, чтобы домены не вернулись к прежнему хаотическому расположению. Для этого магнит не нужно трясти и нагревать.

Почему же намагниченные тела притягиваются? Теория утверждает, что всякая система пытается принять такое положение, в котором ее энергия минимальна.

Почему камень падает на землю? Он падает на землю потому, что стремится занять такое положение, в котором его потенциальная энергия будет минимальной. Другими словами, камень стремится занять энергетически наиболее низкое положение и поэтому падает.

Существуют громоздкие математические формулы, говорящие о том, что суммарная энергия двух магнитов, касающихся один другого, меньше, чем энергия магнитов, разнесенных на некоторое расстояние. Поскольку система должна занять энергетически наиболее "низкое" положение, магниты притягиваются. То же самое можно сказать о магните и куске железа.

Такое объяснение универсально и просто. Если оно вас удовлетворяет, можете считать загадку магнита решенной.

Нужно отметить, однако, что поскольку современное объяснение магнетизма следует из категорий квантовой физики, полная разгадка тайны магнита наступит тогда, когда мы полностью поймем суть пока еще таинственных процессов, происходящих в микромире.

## **Рукотворные магниты**

В этом разделе, начинающегося историей флюгера Оксфордского собора, говорится о тех магнитах, которые сделаны людьми с помощью других магнитов.

Из железа изготавливают множество чрезвычайно полезных вещей. Так, англичанин Вильям Гильберт четыре столетия назад писал:

"Иное железо пригодно для панцирей, иное против выстрелов метательных орудий, иное против мечей и против стали кривых сабель (обычно называемой "цементированной сталью"); одно служит для мечей, другое нужно для лошадиных копыт. Из него делаются гвозди, крюки, задвижки, пилы, ключи, решетки, двери, створки, лопаты, палочки, подпорки, рыболовные и прочие крючки, трезубцы, горшки, треножники, наковальни, молоты, клинья, цепи, ручные и ножные оковы, кирки, сечки, серпы, корзинки, заступы, мотыги, струги, грабли, сошники, вилы, чаши, чашечки, ложечки, ложки, вертелы,

ножи, кинжалы, мечи, секиры, копья, дротики, пики, обоюдоострые мечи, якори и множество нужных для мореходства предметов; кроме того, ядра, короткие копья, шины, панцири, шлемы, нагрудники, конские подковы, ножи, проволоки, струны для музыкантов, кресла, опускаемые решетки, луки, баллисты и гибельные для человеческого рода бомбарды, пули и пушечные ядра и бесконечное множество неизвестных латинянам орудий".

К этому очень полному списку нужно, по-видимому, добавить, по крайней мере, еще один важнейший пункт — из железа делают магниты.

Говорят, настоятель Оксфордского собора никак не мог взять в толк, что от него хочет этот знаменитый Фарадей. Он пришел просить, чтобы ему отдали на исследование железную палку флюгера собора.

- И зачем вам такая старая проржавевшая палка? Того и гляди, флюгер-петух свалится с нее! Ведь она стоит на верхушке собора, наверное, уже лет триста!

- Вот и отлично, — так, надо полагать, ответил Фарадей, — нам как раз и нужна эта заржавевшая развалина. Проследите, пожалуйста, только за тем, чтобы, пока ее снимают и спускают вниз, не меняли бы ее вертикального положения!

Когда палку сняли и поставили вертикально во дворе собора, Фарадей с помощником поднесли поочередно к ее верхнему и нижнему концам компас. Палка флюгера оказалась слабым магнитом — ее нижний конец был южным полюсом, верхний — северным.

Еще раньше, задолго до этих событий, Гильберт заметил, что все железные колонны, стоящие вертикально в Ирландии, сами по себе становятся магнитами, причем нижний их конец всегда южный.

Путешественники, побывавшие в Австралии, рассказывали, что там происходит то же самое — железные колонны всегда становятся магнитами. Только южный полюс у них — наверху.

Точно так же, расположив железный стержень в направлении север — юг, можно заметить, что стержень намагничивается: конец, обращенный к югу, приобретает северную полярность, и наоборот.

Стальные корпуса кораблей, стоящих на стапелях, во время постройки приобретают намагниченность за счет магнитного поля Земли и становятся таким образом гигантскими плавающими магнитами.

Естественные магниты вытачивали из кусков магнитного железняка, и они достигали подчас довольно значительных размеров. По сей день в Тартусском университете находится самый крупный известный естественный магнит. Его масса 13 кг, а подъемная сила 40 кг (в арматуре).

Такие магниты в медной оправе с железными накладками в изобилии выпускались уральскими заводами. Их использовали горные офицеры, моряки, изготовители компасов, исследователи. Такие магниты заказывали и богатые любители курьезов. Обычно оправой магнитов служила красиво отделанная медная коробка, наверху крепилась подвижная ручка, снизу подвешива-

лось "ярмо" с фигурно вырезанной рамкой и крючком для подвески груза. Эти магниты поднимали груз, превышающий по массе сам магнит раз в десять.

Один из самых сильных естественных магнитов был, по преданию, у Ньютона — в его перстень был вставлен магнит, поднимавший предметы, масса которых была в 50 (!) раз больше массы самого магнита.

Искусственные магниты, полученные методом натирания, стали изготавливать в Англии еще в XVIII веке. При изготовлении магнитов не все сорта железа вели себя одинаково — в одном случае быстро получали желаемый результат, в другом — намагниченность была ничтожной. Легконамагничивающиеся вещества, как правило, так же легко и размагничиваются (чистое железо); труднонамагничивающиеся вещества (сталь) остаются сильнонамагниченными и после удаления внешнего магнитного поля. Первые вещества обычно называют магнитомягкими, вторые — магнитожесткими.

В конце прошлого века заметили, что добавка к железу 3% вольфрама примерно в 3 раза улучшает свойства искусственных магнитов. Добавка кобальта улучшает свойства еще в 3 раза.

Лучшим предвоенным магнитным сплавом был сплав альнико на базе алюминия, никеля и кобальта. С помощью магнитов из альнико можно было поднимать железные предметы массой, в 500 раз превышающей массу самого магнита. При измененной технологии (при спекании порошкообразного альнико) удалось поднять предмет, масса которого превосходила массу магнита в 4450 раз.

Еще более сильные магниты изготавливают из сплава магнико, в состав которого входят железо, кобальт, никель и некоторые другие добавки. Созданные на основе этого сплава "порошковые" магниты могут поднимать груз железа массой, более чем в 5000 раз превышающей их собственную.

Еще более сильными являются так называемые оксидно-бариевые магниты.

Неисчислимы примеры применения магнитных материалов. Постоянные магниты являются очень важной частью многих устройств, применяемых в нашей повседневной жизни. Их можно встретить в головке звукоснимателя, в громкоговорителе, электрогитаре, электрогенераторе автомобиля, в небольших моторчиках магнитофонов, в радиомикрофоне, электросчетчиках и прочих устройствах. Изготавливают даже "магнитные челюсти", т.е. сильно намагниченные стальные челюсти, взаимно отталкивающиеся и вследствие этого не нуждающиеся в креплении. Магниты широко применяют и в современной науке. Магнитные материалы нужны для работы в СВЧ-диапазонах, для магнитозаписи и воспроизведения, создания магнитных запоминающих устройств. Магнитострикционные преобразователи позволяют определять глубину моря. Без магнитометров с высокочувствительными магнитными элементами трудно обойтись, если нужно измерить ничтожно слабые магнитные поля, сколь угодно изошренно распределенные в пространстве. Магнитная дефектоскопия — это самостоятельный раздел теории и практики, позволяющий отыскивать поры, каверны, включения в металлических слитках, изделиях разного

размера. Магнитные измерения уже давно взяты на вооружение отделов технического контроля многих предприятий.

Магнитожесткие материалы производятся особой отраслью металлургии, где используются наиболее современные способы плавки и контроля качества. Исходные материалы попадают в мельницы с атмосферой инертных газов, порошки смешиваются, прессуются чудовищно большими давлениями при одновременном наложении громадных магнитных полей, которые ориентируют домены для усиления их действия.

Сплав ЮНКД-ЗБТ, например, кроме железа содержит алюминий (*Ю*), никель (*Н*), кобальт (*К*), медь (*Д*), титан (*Т*). Пропорции подобраны таким образом, чтобы слитки разной формы обладали наибольшей магнитной индукцией, их структуру можно по заказу делать то однородной, то анизотропной, в ней проращиваются в заданном направлении игольчатые кристаллы, тепловые и электромагнитные волны помогают металлофизикам варьировать свойства заготовок, добиваясь объемного распределения их качеств.

В итоге удается создать магниты с весьма высокой подъемной силой. Сплав кобальта с редкоземельными элементами позволяет, например, поднять груз 200 г на 1 г массы магнита.

Самый большой в мире постоянный магнит весит 2 т. С его помощью создается магнитное поле интенсивностью 0,11 Тл в объеме примерно 10 л. Такой магнит применяют во вспомогательном оборудовании ядерного реактора Чикагского университета; это — часть магнитогидродинамической установки для перекачивания жидких металлов.

А бывали случаи, когда с магнитами боролись, когда они оказывались вредными. Возьмем, например, намагничивание корпуса корабля. Такая "спонтанная" намагниченность совсем не безобидна: мало того, что компасы корабля начинают "врать", принимая поле самого судна за поле Земли и неправильно указывая направление, плавающие корабли-магниты могут притягивать железные предметы. Если такие предметы будут связаны с минами, результат притяжения очевиден. Вот почему ученым пришлось вмешаться в проделки Природы и специально размагничивать корабли, чтобы они разучились действовать на магнитные мины. Вот такая история времен Великой Отечественной войны иллюстрирует ответственную работу специалистов по магнетизму в те суровые годы...

Впервые о магнитных минах советские моряки узнали еще в 1919г., когда флот Антанты "засыпал" этим до того невиданным оружием русло Северной Двины. В тех минах железная стрелка поворачивалась под влиянием магнитного поля плывущего неподалеку корабля и замыкала контакты взрывателя. Обезвредить магнитные мины было непросто: они были донными, а не плавающими на якорях, потому обычное траление цели не достигало. Кроме того, взрыв происходил под слабо бронированным днищем корабля, так что корабль был обречен.

Военные моряки нашей страны предвидели опасность возможной войны и предугадали грядущее применение агрессором магнитных мин. По заданию

ВМФ СССР в середине 30-х годов за разработку мер обезвреживания подобного оружия взялся Анатолий Петрович Александров, ныне академик, а тогда 33-летний ученый.

А.П.Александров с коллегами предложили "размагничивать" корабли. Этот метод борьбы с минами поначалу вызвал возражения у многих. Ведь до нуля лишить корабль магнитного поля очень непросто, поэтому оппоненты предлагали заняться разработкой специальных тралов. Противники метода Александра вспоминали про якобы неудачные опыты шестилетней давности по размагничиванию корабля "Марат". Наконец, предлагалось брать пример с англичан, которые решили идти альтернативным путем: намагничивать корабль так сильно, чтобы мина срабатывала задолго до прохождения корабля.

Ученые отстаивали свою правоту. Во-первых, показывая лабораторную модель, которая не действовала на чувствительный датчик магнитного поля, во-вторых, напоминая, что враг может устанавливать мины с "заглублением", срабатывающие только от очень сильного сигнала. Доводы А.П.Александра были признаны убедительными.

События настолько убыстрились, что жизнь стала напоминать киноленту, пушенную с большой скоростью:

1937г. — удачные опыты по размагничиванию судов в Кронштадте.

1938г. — удачное пробное размагничивание "Дозорного" и "Марата".

1939г. — успешное плавание размагниченного "Выборного" над магнитными минами (без заряда) в Онежском озере.

1940г. — замеры полей у судов на Балтике, Днепре, в реке Москве, монтаж опытных систем размагничивания.

1941г. — переход к стационарному оснащению кораблей размагничивающими установками; 21 июня на магнитных минах в Финском заливе взрываются эсминец "Гневный" и крейсер "Максим Горький", 24 июня на одной из донных мин (гитлеровцами выставлена первая партия из 160 магнитных мин) подорвался тральщик БТЩ-208, в июне А.П.Александров защищает докторскую диссертацию; размагничен крейсер "Киров"; формируются коллективы из ученых, моряков и судостроителей для массового оснащения кораблей токонесущими обмотками, нивелирующими намагниченность корпуса.

1942г. — в составе большого коллектива А.П.Александров награжден Государственной премией СССР за успешное научное решение и практическое осуществление проблемы защиты от магнитных мин кораблей Балтийского, Черноморского, Североморского и Тихоокеанского флотов.

После 1942г. ни один советский корабль не подорвался на магнитной mine.

...Магнетизм "положения" приобретают все железные предметы, длительно лежавшие в магнитном поле, — будь то поле Земли или поле другого магнита. Магнетизмом положения еще в древние века пользовались кузнецы — первые люди, получавшие магниты искусственным путем из обыкновенного железа.

Магнетизм положения — частное проявление более общего случая. Известно, что любое железное или стальное тело, внесенное в поле магнита, само

становится магнитом. К гвоздю, притянutoму подковообразным школьным магнитом, притягивается бритва, к ней — скрепка и так далее.

На этом принципе основан применяемый некоторыми врачами очень полезный инструмент для извлечения из желудка и дыхательных путей рассеянных пациентов игл, булавок и других железных предметов. Этот инструмент, называемый магнитным зондом, опускается, например, в желудок пациента. За операцией следят на экране специальных мониторов. Секрет зонда, с помощью которого можно вынуть из желудка даже раскрытую английскую булавку, заключается в том, что железный наконечник его является магнитом не всегда, а лишь в необходимый момент. Это происходит вследствие того, что внутри зонда пропущен гибкий стальной стержень. При необходимости "включить" магнит наружный конец стержня подсоединяют к постоянному магниту. Стержень намагничивается и притягивает к себе проглоченный предмет.

Намагничивание железных предметов от находящегося поблизости магнита доставляет и по сей день неприятности людям, носящим часы и по долгу службы имеющим дело с мощными магнитами. В таких часах все железные части намагничиваются и к силе пружинки в них добавляются силы притяжения, искажающие ход часов до такой степени, что ими становится невозможно пользоваться. В конце XIX века эта проблема приобрела столь крупные масштабы, что понадобилась разработка прибора для размагничивания часов. А предприимчивая часовая компания "Валтхам", в свою очередь, выпустила в 1888г. часы, которые не боялись никаких магнитных полей. Для испытания эти часы поместили на 15 мин у самого жерла гигантской "пушки-магнита" майора Кинга. Секрет фирмы оказался очень простым. Самым надежным экраном для предохранения железных частей механизма — пружинки, балансира — от намагничивания является само железо. Корпус часов "Валтхама" был изготовлен из обычной магнитной стали.

Искусственные магниты можно также получить, натирая куском магнитного железняка в одном направлении железные бруски или просто прислоняя ненамагниченный образец к постоянному магниту. Интересно, что этим способом можно получить искусственные магниты гораздо более сильные, чем исходные.

## **Гильберт разъединяет**

Лев Николаевич Толстой работал и на ниве научно-популярного жанра. Вот что писал он об электричестве:

"Когда придумано было это электричество, стали его прилагать к делу: придумали золотить и серебрить электричеством, придумали свет электрический и придумали электричеством на дальнем расстоянии с места на место передавать знаки. Для этого кладут куски разных металлов в стаканчики, в них наливают жидкости. В стаканчиках набирается электричество, и это электричество проводят по проводочке в то место, куда хотят, а из того места проводку проводят в землю".

Надо полагать, что великий писатель, написав фразу: "Когда придумано было это электричество", имел в виду сравнительно недавние времена — что-нибудь 100... 150 лет до времени Толстого или 150...200 лет до нашего времени.

У современных ученых есть некоторые основания утверждать, что "придумано было это электричество" три-четыре тысячи лет назад и что "придумали золотить и серебрить электричеством" в то же самое время. Доказательством, возможно, могут служить "странные" предметы, найденные археологами в засохшем и отвердевшем иле неподалеку от берегов Тигра, южнее Багдада.

Что представляли собой эти странные предметы? И, собственно, чем они странны? Дело в том, что археологи долгое время не могли понять их назначения. Небольшие сосуды из отожженной глины имели весьма необычную "начинку" — разъеденные медные цилиндрики и железные бруски." Исследовав цилиндрики, археологи пришли к выводу, что разъедание, скорее всего, результат воздействия или уксусной, или лимонной кислот, хорошо известных в то время. Однако самое неожиданное находилось на дне сосудов — это был небольшой и невзрачный на вид слой битума, того самого битума, который и сегодня иногда используют в качестве электрической изоляции.

Ученые рассуждали так: если в сосуд с кислотой помещали медную и железную пластины, разделенные изоляцией (битумом), то это было не что иное, как древнейший химический источник тока. Источник, честь открытия которого отдана нами человеку, жившему на три тысячи лет позже!

По мнению некоторых ученых, золотое покрытие вавилонских украшений сделано настолько тонко, что всякий метод нанесения золота, кроме гальванического, исключается!

Может быть, древние знали об электричестве гораздо больше, чем нам кажется...

Известный египтолог Бругш Паша установил, что в египетских храмах существовали... громоотводы! Они представляли собой высокие деревянные мачты с металлической обшивкой. Такие же шесты, только сделанные из железа, были известны древним индусам...

Высокие медные статуи времен римских деятелей Нумы Помпилия и Туллия Гостилия тоже служили для того, чтобы отводить удары громовержца от грешных голов горожан...

Во время царствования императора Карла Римского крестьяне "для отвода грозы" ставили на полях высокие колья. Но отметим, однако, что сам император сурово карал за это под вполне современным лозунгом борьбы с суевериями.

Неужели и электрическая природа молний была очевидна древним, как она лишь относительно недавно стала ясна Франклину?

Принято считать, что об электричестве человечество узнало в тот момент, когда юная дочь Фалеса из Милета, замечательного наблюдателя и философа-материалиста, пытаясь очистить свое янтарное веретено от приставших к нему



мелких пылинок и ниточек, заметила, что, счищенные, они снова спешат прильнуть к нему...

Видимо, свойство янтаря притягивать мелкие тряпочки, нитки, солому было весьма хорошо известно и до Фалеса, и не только в Милете. Этим притяжением объясняются, очевидно, и названия янтаря у разных народов: электрон — притягивающий к себе (Греция), харпакс — грабитель (Рим); кавуба — притягивающий к себе мякину (Персия) и т.п.

И еще одно таинственное свойство было у янтаря и подобных ему предметов: потерев янтарь в темноте, можно было видеть, как весь он взрывается голубоватыми искрами. Искры сопровождает тихий треск, почти неслышимый шорох. Явление это было столь слабо ощутимо, что отождествлять его с грандиозным сверкающим мечом — молнией и громом, которые внушали древним панический страх, было почти невыносимым. Потребовались тысячелетия, чтобы перекинуть мост между этими столь близкими по природе и столь различными по масштабу явлениями.

Можно лишь поражаться тому, что лишь через две тысячи лет после Фалеса таинственные свойства янтаря привлекли внимание исследователя. Им оказался английский врач Вильям Гильберт из Колчестера.

Вильям Гильберт родился в 1540г. Сразу после школы он поступил в колледж святого Джона в Кембридже, через два года он становится бакалавром, через четыре — магистром, через пять — доктором медицины. Постепенно он достигает вершины медицинской карьеры тех времен и становится лейб-медиком королевы.

Трудно сказать, почему именно медик написал первую научную работу по магнетизму. Может быть, это было связано с тем, что толченый магнит у средневековых лекарей считался сильным слабительным. Сам Гильберт полагал, что магнитное железо "...возвращает красоту и здоровье девушкам, страдающим бледностью и дурным цветом лица, так как оно сильно сушит и стягивает, не причиняя вреда".

Однако горький опыт показал Гильберту, что магниты при приеме внутрь иногда "...вызывают мучительные боли во внутренностях, чесотку рта и языка, ослабление и сухотку членов".

Может быть, экскурсии Гильберта в природу магнетизма и были порождены желанием узнать, где истина: является магнит лекарством или нет. Гильберт приходит к выводу, что "природа магнита двойственная, и больше — злобная и пагубная". По пути к этому выводу Гильберт делает ряд других, значительно более ценных. Что было известно науке о магните до Гильберта?

В 1269г. Пьер Перегрин из Марикурта написал книгу "Письма о магните", в которой собрал много сведений о магните, накопившихся до него и открытых им лично. Перегрин впервые говорит о полюсах магнитов, о притяжении ("совокуплении") разноименных полюсов и отталкивании одноименных, об изготовлении искусственных магнитов путем натирания железа естественным природным магнитом, о проникновении магнитных сил через стекло и воду, о компасе. Причину притяжения южного и северного полюсов Перегрин и его

последователи объясняли довольно туманно: "Южная часть притягивается той, которая имеет свойства и природу севера, хотя они обе имеют одну и ту же специфическую форму. Однако это не исключает некоторых свойств, существующих более полно в южной части. Но эти свойства северная часть имеет лишь в возможности, и поэтому они при этой возможности и проявляются".

Ценность этой точки зрения заключается в том, что она, наталкивая на размышления, привела средневекового арабского мыслителя Ибн-Рушда (Аверроэса) к гениальной догадке. По его мнению, естественный магнит искажал ближайшее к нему пространство в соответствии с его формой. Ближайшие к магниту области среды, в свою очередь, искажали ближайшие к ним и так до тех пор, пока "специи" не достигали железа. В этих рассуждениях снова видится намек на существование магнитного поля — особой формы материи.

До Гильберта было известно и явление "старения магнитов". Так, алхимик Гебер (XII век) писал: "У меня был магнит, поднимавший 100 драхм железа. Я дал ему полежать некоторое время и поднес к нему другой кусок железа. Магнит его не поднял. В куске оказалось 80 драхм. Значит, сила магнита ослабла".

К другим важнейшим догильбертовским событиям можно отнести открытие в XIV веке магнитного склонения, обнаруженные Колумбом в 1492г. изменения склонения магнитной стрелки на одной и той же параллели, а также открытие магнитного наклонения Георгом Гартманом (Нюрнберг, 1544г.).

В течение 18 лет Гильберт на собственные деньги ставит бесчисленное количество опытов, которые он описывает в книге "О магните, магнитных телах и о большом магните — Земле. Новая физиология, доказанная множеством аргументов и опытов", вышедшей в 1600г. И сам Гильберт, и его современники чрезвычайно высоко оценивали этот труд. Так, Гильберт впервые в истории книгопечатания ставит свое имя впереди названия книги, подчеркивая тем самым свои заслуги.

Заслуги его действительно велики. Самой значительной из них явилось то, что он впервые в истории, задолго до Бэкона, провозгласил опыт критерием истины и все положения проверял в процессе специально поставленных экспериментов.

Изготовив из магнетита шар-терреллу ("маленькую Землю"), Гильберт заметил, что этот шар по магнитным свойствам сильно напоминает Землю. У терреллы так же, как и терры (Земли), оказались северный и южный полюсы, экватор, изолинии, магнитное наклонение. Эти свойства позволили Гильберту провозгласить Землю "большим магнитом". До Гильберта о магнетизме Земли никто не подозревал, и притяжение северного, окрашенного в черный цвет конца магнитной стрелки (Кстати, почему южный конец магнитной стрелки красный, а северный черный? Не исключено, что здесь использованы древнекитайские традиции. Китайцы всегда окрашивали южный конец стрелки в красный цвет. В древнем ассирийском календаре времен Александра Македонского север называется черной страной, юг — красной, восток — зеленой и запад — белой. Городские ворота в Китае окрашивались всегда в соответствии

с этим правилом. Вполне вероятно, что такое обозначение стран света было в то время общепринятым и отголоском этого являются названия Черного и Красного морей, лежащих на юг и север от центрального — Средиземного.) к северному полюсу Земли объяснялось в средние века тем, что "железо направляется к северным звездам, так как ему сообщена сила полярных звезд, подобно тому, как Солнцу следуют растения, например подсолнечник".

Гильберт опроверг широко распространенное мнение о влиянии алмазов на магнитные свойства. Он собрал 17 крупных алмазов и в присутствии свидетелей показал, что эти камни никоим образом не влияют на магниты.

Он открыл, что при нагревании магнита выше некоторой температуры его магнитные свойства исчезают; впоследствии эта температура ( $588^{\circ}\text{C}$ ) была названа точкой Кюри, в честь Пьера Кюри.

Гильберт открыл, что, когда приближают к одному полюсу магнита кусок железа, другой полюс начинает притягивать сильнее. Эта идея была запатентована лишь через 250 лет после смерти Гильберта.

Гильберт открыл, что предметы из мягкого железа, в течение долгого времени лежащие неподвижно, приобретают намагниченность в направлении север — юг. Процесс намагничивания ускоряется, если по железу постукивать молотком. (С этим явлением автору пришлось встретиться в одной из служебных командировок на электростанцию небольшого южного городка. Вызов был странным: "Срочно вылетайте выяснения причин магнитности турбин". Оказалось, что при работе громадные паровые турбины (тогда самые большие в мире) превращаются в гигантские магниты, собирающие со всего машинного зала болты, шпильки, гвозди, гаечные ключи. При исследовании выяснилось, что турбины поступали уже сильно намагниченными. При транспортировке турбины были ориентированы с севера на юг, а перестук колес ускорил намагничивание. При работе турбина, вращаясь в собственном магнитном поле, стала генератором постоянного тока и еще больше намагнитила себя этим током. В конце концов турбина превратилась в очень сильный магнит, о чем можно было судить хотя бы по тому обстоятельству, что для отрыва от турбины ее стальной крышки пришлось использовать пятидесятитонный кран.)

Гильберт открыл экранирующее действие железа. Он первым сказал, что магнит со "шлемом" или "носом", т.е. магнит, вправленный в арматуру из мягкого железа, притягивает гораздо сильнее. Гильберт высказал гениальную мысль о том, что действие магнита распространяется подобно свету.

Гильберт многое сделал и открыл. Но... Гильберт почти ничего не смог объяснить. Все его рассуждения носят схоластический и наивный характер.

Весьма туманно объяснял Гильберт и природу магнетизма. Его ответ, по существу, сводится к тому, что всему причиной душа магнита. Это, в известной мере, шаг назад по сравнению с объяснением Лукреция. Оправданием великому первооткрывателю может, видимо, служить лишь то, что и с позиций современной квантовой физики притяжение магнита не такая уж очевидная вещь... Другим, значительно более серьезным извинением может служить то, что за словом "душа" у Гильберта иногда ясно слышится слово "поле"...

Очень важным в учении Гильберта представляется то, что он, по-видимому, первым отличил электрические явления от магнитных, вскрыв их различную природу. Гильберту удалось разделить магнитные и электрические явления, которые с тех пор стали исследовать раздельно.

Франклин, Ломоносов, Араго изучают...

В этой главе рассказывается о янтарном перстне; о тайне дергающихся лапок; о том, как человек узнал, что магнетизм и электричество — близкие родственники; о пользе тесноты в лабораториях.

Гильберт обнаружил довольно много веществ, которые, как и янтарь, могут притягивать мелкие кусочки материи и пылинки. Манипулируя с этими и подобными веществами, любознательный бургомистр немецкого города Магдебурга Отто фон Герике изготовил странную машину — это был шар из серы, приводимый во вращение несложным механизмом. Вращающийся шар касался металлической цепочки, присоединенной к длинному металлическому бруску, подвешенному на веревках. Если шар при вращении придерживали ладонями, то на нем накапливался значительный электрический заряд, отводимый цепочкой к бруску.

Шары из серы изготавливали следующим образом: из стекла выдували тонкий шарообразный сосуд, в который заливали расплавленную серу. Когда сера остывала, стекло разбивали и получали шар из серы. (К сожалению, Герике слишком уважал ученых своего времени, чтобы вращать просто стеклянный шар. Ему нужен был шар из серы, поскольку именно о ней писал Гильберт. Об электрических свойствах стекла было тогда известно очень мало. А ведь если бы бургомистр попробовал тереть ладонями стеклянный шар, он бы получил более мощную машину!) С помощью шара из серы Отто фон Герике удалось провести очень эффектные опыты: при трении шара о ладони между руками и бруском проскакивали искры, причем некоторые из них были довольно крупными.

Машина Герике получила сразу же очень широкое распространение, и неудивительно, что с ее помощью удалось обнаружить много электрических эффектов.

Один из необычных случаев произошел в знаменитой Лейденской лаборатории. Студент по имени Канеус использовал машину Герике для того, чтобы "зарядить электричеством" воду в стеклянной колбе, которую он держал в ладонях. Зарядка осуществлялась при помощи цепочки, подсоединенной к бруску машины. Цепочка спускалась через горлышко колбы в воду. По истечении некоторого времени Канеус решил убрать свободной рукой цепочку — вынуть ее из сосуда. Прикоснувшись к цепочке, он получил страшный электрический удар, от которого чуть не умер.

Оказалось, что в сосудах такого типа электричество может накапливаться в очень больших количествах. Таким образом была открыта так называемая лейденская банка — простейший конденсатор.

Сведения о новом изобретении быстро распространились по Европе и Америке. Во всех лабораториях и аристократических салонах ставились удивительные опыты, одновременно неприятные, забавные и таинственные.

Столица Франции, естественно, не осталась в стороне от этого "лейденского поветрия". Придворный электрик Людовика XVI иезуит Нолле провел такой опыт: сто восемьдесят монахов взялись за руки. В тот момент, когда первый монах взялся за головку банки, все 180 монахов, сведенные одной судорогой, вскрикнули с ужасом. Несмотря на неприятное ощущение, тысячи людей хотели подвергнуться этому испытанию. Изготавливались новые банки, более мощные.

Лейденская банка стала одним из необходимейших атрибутов многих исследований. С ее помощью можно было получить электрические искры длиной в несколько сантиметров.

И на родине Гильберта продолжались исследования электричества. Этим занимался Ньютон, его лаборант научился передавать заряд лейденской банки по влажной веревке.

Наиболее дальновидному исследователю пришла в голову мысль о том, что и сверкающая молния, раскалывающая грозовое небо, — это грандиозная электрическая искра, полученная с помощью исполинской лейденской банки... Этим исследователем оказался американец Бенджамин Франклин (1706 ...1790). Сын бедных родителей, он мало ходил в школу, то помогал отцу варить мыло, то обучался слесарному делу, то выполнял поручения брата-типографа.

В двадцать семь лет он стал популярнейшим писателем. Его "Бедный Ричард" выдержал бесчисленное количество изданий. "Я мог бы попытаться вызвать к себе добрые чувства, провозгласив, что я пишу эти выпуски не для чего иного, как для блага общества; но это было бы неискренне, и, кроме того, современники мои слишком умны для того, чтобы быть обманутыми таким образом... Истина же в том, что я крайне беден, и... издатель обещал мне значительную часть выручки...", — откровенно писал Франклин по поводу своей писательской деятельности.

Физикой он заинтересовался после того, как прослушал лекцию по электричеству, на которой была показана электрическая искра и продемонстрировано неприятное действие на человека разряда лейденской банки. Пользуясь словами батарея, конденсатор, проводник, заряд, разряд, обмотка, мы вряд ли помним о том, что Франклин был первым, кто дал названия всем этим предметам и явлениям. Всего семь лет он занимался физикой (с 1747 по 1753г.), но его вклад в науку оказался огромным.

В последние годы жизни Франклин стал одной из выдающихся фигур в политической жизни Америки, активным борцом за освобождение ее от колониального ига Англии. Обаятельнейший, интереснейший человек своего времени, веселый и жизнерадостный, атлетически сложенный, Франклин был всегда окружен почитателями.

Обратимся же к семи "электрическим" годам из жизни Франклина, точнее, к тем из них, которые были связаны с доказательством электрической природы молнии.

После случайно прослушанной лекции Франклин развил довольно простую, но стройную и правильную теорию статического электричества и его передачи от одного тела к другому — ту теорию, которую мы узнали в школе, впервые знакомясь с электричеством. Сейчас мы сделали бы лишь одну поправку к этому учению: Франклин наугад принял, что тело, которое накапливает электричество, заряжается положительно, а тело, теряющее электричество, заряжается отрицательно. Мы знаем теперь, что носителем электричества в проводниках является отрицательно заряженный электрон. Поэтому наэлектризованное тело, на наш взгляд, должно быть признано отрицательным. Естественно, что Франклин не мог предугадать этого. Чтобы не ломать установившегося со времен Франклина представления, сейчас направление тока (от "плюса" к "минусу") принимают обратным направлению происходящего в действительности процесса — движения электронов.

Четкие представления Франклина о природе электричества позволили ему создать теорию, по которой и молния есть не что иное, как электрическая искра. В одном из своих трудов Франклин описал, как нужно поставить доказывающий это опыт.

Француз Далибар, по описанию Франклина, провел в Марли опыт: металлический стержень, установленный на горе, приближали одним концом к заземленному стержню. Во время грозы 10 мая 1752г. Далибар получил из грозового облака большую синюю электрическую искру, сопровождавшуюся резким треском и запахом озона. Уже через восемь дней Далибар показал этот опыт королю.

Однако, хотя Далибар первым получил "молнию с небес", ясно, что первооткрывателем был Франклин. В 1753г. Франклин поставил и свой знаменитый эксперимент с воздушным змеем.

В том же году аналогичные эксперименты провели М.В.Ломоносов и Г.В.Рихман. Рихман хотел количественно оценить явление электризации при разряде молнии. Неосторожно наклонившись слишком близко к стержню своей "громовой машины", Рихман был поражен молнией в голову.

Научный мир содрогнулся. И до того молнии убивали, особенно звонарей у колоколов на церковных башнях, а тут жертвой оказался ученый. По Ломоносову, "погиб Рихман славной смертью", печалился петербургский коллега Крафт ("это был второй Плиний"), оплакивал учителя молодой Румовский ("молнией поражен Орфей, Эскулап и Зороастр"). Со временем страсти утихли, а ученые стали принимать меры безопасности.

К.Г.Кратценштейну (1723...1795), который констатировал ужасную смерть Рихмана от разряда, вошедшего в висок и покинувшего тело через мизинец ноги ("башмак разодравши, но даже не прожегши"), не суждено было утешиться до конца жизни. Он приехал в Петрополь служить механиком в Академии наук уже известным доктором медицины и философии, получив

премию Академии Бордо за объяснение механизма подъема водяных паров в воздухе, будучи избранным в Академию Леопольдины за излечение электризацией паралича пальца у женщины. Рихмана он, по его мнению, не уберег, в отчаянии уехал из России, даже не продлив контракта с Академией Санкт-Петербурга, и осел в Копенгагене до конца своих дней.

О молнии и защите от нее всегда ходило множество диковинных рассказов и небылиц. Известно было, например, что кельтские воины, если гроза застигала их в поле, ложились на землю, зажигали факел и втыкали в землю острием вверх свои длинные мечи. Молния била в мечи и уходила в землю, не причиняя вреда воину.

Много позднее итальянец Вольта на опыте показал, что пламя свечи создает столб теплого воздуха, электропроводность которого повышена. Сам ученый построил эффектный электрометр со свечой, вдохновляясь, как он говорил, примером древнеегипетских жрецов. Когда надо было "выпросить бога", они разжигали огромный жертвенный костер, по столбу дыма из небес в землю била молния, якобы возвещавшая волю Юпитера, Зевса или Озириса.

Впрочем, о древних громоотводах забылось, только монахи пытались отогнать громы и молнии охранными молитвами, а в народе далекими отзвуками прошлого жили странные рассказы о молниях, богах, грозах и жертвах небесного огня. И нет числа таким рассказам, как не было меры тайне, сопутствующей природе молнии. Неудивительно, что после предложения Франклина поставить железные палки для защиты от молнии, Европа и Америка разделились на два лагеря: ярых приверженцев громоотвода и столь же ярых его противников. В Париже одно время считались модными шляпки с громоотводом. В то же время парижский домовладелец де Визери, поставивший на своем доме на Сен-Опера громоотвод, подвергся яростным нападкам соседей, которые в конце концов подали на него в суд. Это было в 1780г. Процесс длился четыре года. Защитником громоотвода на процессе выступал никому еще не известный адвокат Максимилиан Робеспьер. На стороне противников громоотвода экспертом выступал Жан-Поль Марат. В конце концов де Визери был оправдан... Но французы еще долго противились громоотводу. Может быть, это продолжалось бы и дальше, если бы не один курьезный случай.

В Филадельфии (США) в 1782г. было установлено 400 громоотводов (всего в Филадельфии было в то время 1300 домов). Крыши всех общественных зданий, за исключением, разумеется, гостиницы французского посольства, были увенчаны металлическими штырями громоотводов. Во время грозы 27 марта 1782г. именно в дом-исключение ударила молния. Гостиница была частично разрушена, а живший в ней французский офицер убит. После этого случая, вызвавшего широкий общественный резонанс, даже Франция официально признала громоотвод.

Возможно, лишь после этих очень громких процессов и событий электрическая природа молнии стала общепризнанной. Ни у кого не оставалось сомнений в том, что молния — это электрическое явление. Связь молнии с электричеством была прочно доказана. Примерно в это же время ученые стали поне-

многу подходить к восприятию идеи о том, что молния каким-то образом связана и с магнетизмом. Однако перебросить такой мостик было чрезвычайно сложно главным образом из-за недостатка систематических сведений, касающихся магнита.

Какая неведомая, таинственная сила направляет стрелку компаса? В чьих силах сообщить неживому камню способность двигаться, присущую только живому? Кто бы мог подумать, что именно электричество порождает столь разные и столь могучие эффекты — и молнию, и магнетизм?

Правильное направление мыслям ученых о природе магнетизма, как и в случае электричества, дала молния.

В начале XIX столетия французский ученый Франсуа Араго выпустил книгу "Гром и молния". В этой книге содержится несколько любопытнейших записей, некоторые из них, быть может, и привели к тому, что приятель Араго, французский физик Андре-Мари Ампер, впервые дал правильное объяснение магнетизму.

Вот некоторые выдержки из книги "Гром и молния": "...В июле 1681 года корабль "Квик" был поражен молнией. Когда же наступила ночь, то оказалось по положению звезд, что из трех компасов... два, вместо того, чтобы, как и прежде, указывать на север, указывали на юг, прежний северный конец третьего компаса направлен был к западу..."

И еще: "...В июне 1731 года один купец поместил в углу своей комнаты в Уэксфильде большой ящик, наполненный ножами, вилками и другими предметами, сделанными из железа и стали... Молния проникла в дом именно через угол, в котором стоял ящик, разбила его и разбросала все вещи, которые в нем находились. Все эти вилки и ножи... оказались сильно намагниченными..."

Все более очевидным для исследований становился факт тесной связи молнии и магнетизма. Следует учесть, что связь молнии и электричества была в то время хорошо известна, поэтому становится ясным, что недалек был день, когда наиболее прозорливый увидит связь между электричеством и магнетизмом. Многие уже почти угадали эту связь; не хватало лишь небольшого усилия, чтобы преодолеть барьер, разделяющий две великие силы природы. Так, петербургский академик Франц Ульрих Теодор Эпинус прочел 7 сентября 1758г. на общем собрании Академии трактат "О сходстве электрической силы с магнитною", в котором он почти вплотную подошел к решению проблемы. Недоставало какого-то мостика, какой-то связующей нити... Надежды усилились, когда научные круги Европы познакомились с итальянскими "новинками" — опытами профессора анатомии Алоизо Луиджи Гальвани.

Случайно получилось так, что в комнате, где в ноябре 1780г. Гальвани изучал на препарированных лягушках их нервную систему, работал его приятель — физик, производивший по методу Вольты опыты с электричеством. Одну из отпрепарированных лягушек Гальвани по рассеянности положил на стол рядом с электрической машиной. В это время в комнату вошла жена Гальвани. Ее взору предстала жуткая картина: при искрах в электрической машине лапки мертвой лягушки, прикасавшиеся к железному предмету (скаль-



пелю), дергались. Жена Гальвани с ужасом указала на это мужу. Гальвани был поражен и решил, что причина этого — электрические искры. Для того чтобы получить более сильный эффект, он вывесил несколько препарированных лягушек на медных проволочках на железный балкон во время грозы. Однако не только молнии — гигантские электрические разряды — влияли на поведение лягушек. При порывах ветра лягушки раскачивались на своих проволочках и иногда касались железного балкона. Как только это случалось, лапки дергались.

Опыты Гальвани пробудили в широкой публике старые мечты о бессмертии. Бессмертие казалось совсем близким, осязаемым. Сегодня содрогается лапка убитой лягушки, а завтра... Бесчисленное количество людей стали проделявать опыты по методике Гальвани.

Вот что писали об этом в одной из старых энциклопедий:

"В течение целых тысячелетий хладнокровное племя лягушек беззаботно совершало свой жизненный путь, как наметила его природа, свободно росло и наслаждалось земными благами, зная одного только врага, господина аиста, да еще, пожалуй, терпя урон от гурманов, которые требовали для себя жертвы в виде пары лягушачьих лапок со всего несметного рода. Но в исходе позапрошлого столетия наступил злосчастный век для лягушек. Злой рок воцарился над ними, и вряд ли когда-либо лягушки от него освободятся. Затравлены, схвачены, замучены, скальпированы, убиты, обезглавлены — но и со смертью не пришел конец их бедствиям. Лягушка стала физическим прибором, отдала себя в распоряжение науки. Срезают ей голову, сдерут с нее кожу, расправят мускулы и проткнут спину проволокой, а она все же не смеет уйти к месту вечного упокоения; повинувшись приказанию физиков или физиологов, нервы ее придут в раздражение и мускулы будут сокращаться, пока не высохнет последняя капля "живой воды". И все это лежит на совести Алоизо Луиджи Гальвани..."

Но и сам Гальвани не был счастлив. Умерла любимая жена Лючия, он лишился кафедры за отказ присягнуть Наполеону, занявшему Италию, погибли два его племянника. Вскоре и сам ученый умер от голода.

Понять, почему лапки мертвых лягушек дергаются, Гальвани не было суждено. Лишь великий Алессандро Вольта понял, что соединение разных металлических проводников (у Гальвани медная проволока была привязана к железному балкону) само по себе вызывает появление на их концах электрических зарядов. Если замкнуть концы через тело лягушки, образуется электрический ток, который является не кратковременным, как при "страшных опытах" Отто фон Герике, а длительным. О природе этого тока у Вольты с Гальвани был очень серьезный спор: Гальвани был уверен, что источником тока является сама лягушка, а Вольта считал, что первопричина тока — соединение двух разных металлов.

Хотя в споре Гальвани оказался не прав, он тем не менее заложил основы учения о биотоках организма.

Вольта ставил совсем другие опыты — он скептически относился к теории "животного электричества" Гальвани. Иногда его можно было увидеть за странным занятием: он брал две монеты или два кружочка — обязательно из разных металлов — и... клал их себе в рот: одну на язык, другую под язык. Если после этого монеты или кружочки соединяли проволочкой, Вольта чувствовал солоноватый вкус — тот самый вкус, но гораздо слабее, что можем почувствовать мы, лизнув одновременно два контакта батарейки. Из опытов, проведенных раньше с машиной Герики и электрофором, Вольта знал, что такой вкус вызывается электричеством. Положив один на другой множество кружков (свыше ста), Вольта получил довольно мощный источник электричества — вольтов столб. Присоединив к верхнему и нижнему концам столба проводники и взяв их в рот, Вольта убедился в том, что этот источник, в отличие от машины Герики и электрофора, действует длительно.

Вслед за этим Вольта сделал еще одно изобретение — он создал электрическую батарею, пышно названную "короной сосудов" и состоявшую из многих последовательно соединенных цинковых и медных пластин, опущенных попарно в сосуды с разбавленной кислотой. Это был уже довольно солидный источник электрической энергии (солидный, конечно, по тем временам; сейчас с помощью "короны сосудов" можно было бы привести в действие разве что электрический звонок).

20 марта 1800г. Вольта сделал доклад о своих исследованиях в Лондонском Королевском обществе. Можно считать, что с этого дня источники постоянного электрического тока — вольтов столб и батарея — стали известны многим физикам и их начали широко применять. Распространению этого изобретения и расширению опытов с электричеством способствовало приглашение Вольта Наполеоном в Париж для чтения лекций перед видными физиками Франции. В России тоже довольно быстро узнали об открытии Вольта. Одна из самых гигантских и мощных электрических батарей того времени, состоящая из 3000 "кружков", была построена русским профессором В.В.Петровым, открывшим с помощью этой батареи прославившую его электрическую дугу.

Уже в 1808г. известный английский физик сэр Гемфри Дэви осуществил электрическое дуговое освещение на практике. Электричество начало свое победное шествие по всему миру. Особенно быстро развивалось электрическое освещение. Небольшие лампы предлагалось даже помещать на головах слуг и служанок в богатых домах. Так, журнал "Сайнтифик Америкэн" писал в середине прошлого века:

"Вскоре настанет то время, когда и частные дома будут освещаться девушками, вместо того чтобы использовать электрические лампы на колоннах. Такая девушка (яркостью в 50...60 свечей) будет сидеть в кресле гостиной и ждать, пока не позвонят гости — тогда она включит на себе свет, примет посетителя и проводит в приемную. Стоимость такой девушки будет гораздо ниже стоимости необходимого для приема специального слуги и газового освещения. Гораздо приятней иметь в доме электродевушку, чем громоздкие

канделябры, которые постоянно угрожают упасть вам на голову. Каждый домовладелец с эстетическим чувством будет рад заменить канделябры девушками, для которых уже выпущено 2500 комплектов ламп и батарей".

Электричество уже до этого прочно вошло в обиход физических лабораторий. С ним проводились многочисленные опыты на животных, с его помощью получали дугу и миниатюрные молнии — искры.

Слово "электричество" вошло в лексикон простых людей. Электричество подозревали теперь во всех труднообъяснимых и таинственных случаях. Взгляды того времени — во фразе: "Все электрическое — таинственное, поэтому все таинственное — электрическое". Роберт Берне в своем шутовском стихотворении "Золотое кольцо" еще раньше писал:

*— Зачем надевают кольцо золотое  
На палец, когда обручаются двое?  
Меня любопытная дева спросила.  
Не став перед вопросом в тупик,  
Ответил я так собеседнице милой:  
— Владеет любовь электрической силой,  
А золото — проводник!*

Очень близко к решению проблемы подошел Дэви. Ему удалось установить, что электрическая дуга отклоняется под действием магнита. Это уже была связь, но связь робкая, тонкая, связь, которой не придали должного значения. Магнитная стрелка впервые повернулась под действием тока в опытах итальянского физика Романьози: в 1802г. Романьози заметил, что при поднесении компасной стрелки к вольтову столбу она чуть заметно отклоняется. Иногда никакого эффекта не наблюдалось. Романьози не смог понять того, что стрелка отклонялась лишь тогда, когда вольтов столб замкнут на нагрузку, другими словами, лишь тогда, когда по нему течет ток.

Открыть это выпало на долю Ганса Христиана Эрстеда.

### **Эрстед объединяет**

Когда 43-летний копенгагенский профессор Ганс Христиан Эрстед (1777...1851) разослал европейским коллегам свой ставший сразу знаменитым "Памфлет" о действии электрического тока на магнитную иглу — всего четыре странички на латинском языке — и когда многие ученые смогли с ним познакомиться, их удивлению не было границ. Неужели ток действует на магнит столь странно?

Чтобы разобраться в "проблеме Эрстеда", которую бесспорно следует считать ключевой в учении об электричестве и магнетизме, нужно вернуться на два столетия назад и представить себе маленький датский остров Лангеланд, городок на нем под названием Рюдкобинг и семью бедного аптекаря, в которой родился Ганс Христиан. Нужда гналась за семьей по пятам, и начальное

образование братьям Гансу Христиану и Андерсу пришлось получать где придется: городской парикмахер учил их немецкому; его жена — датскому; пастор маленькой церквушки научил их правилам грамматики, познакомил с историей и литературой; землемер научил сложению и вычитанию, а заезжий студент впервые рассказал им удивительные вещи о свойствах минералов, пробудил любознательность и приучил любить аромат тайны. В двадцать лет Ганс, приобщенный к науке и познавший столь малую часть ее, уже вынужден был стоять за стойкой отцовской аптеки и помогать ему. Здесь медицина надолго пленила его, потеснив химию, историю, литературу, и еще более укрепила в нем уверенность в его научном предназначении. Он решает поступить в Копенгагенский университет, но не знает, что изучать. Он берется за все: за медицину, физику, астрономию, философию, поэзию. Он увлечен всем сразу и всем серьезно. Как нельзя кстати помогла стипендия, основанная тем самым доктором медицины Кратценштейном, который родился в Германии (шестой сын бедного учителя), окончил университет в Галле, несчастливо служил в Академии Санкт-Петербурга, после чего 42 года преподавал в университете города Копенгагена.

Вместе с Гансом учился и брат, но юриспруденции. Держась за руки, братья гуляли по зеленым лужайкам университетских дворов или сидели на ступенях старинных зданий или в гулких аудиториях, отрешенные, с горящими глазами. Их начинающееся служение науке было сродни какому-то мистическому действию, столь подходящему для этих монастырских стен и холодных келий со стрельчатыми окнами. Ганс был счастлив в университетских стенах; он писал позднее, что для того, чтобы юноша был абсолютно свободен, он должен наслаждаться в великом царстве мысли и воображения, где есть борьба, где есть свобода, где побежденному дано право восстать и бороться снова. Он жил, упиваясь трудностями и первыми небольшими победами, познанием новых истин и устранением предыдущих ошибок. Но чем он занимался? Золотая медаль университета 1797г. была присуждена ему за эссе "Границы поэзии и прозы". Он разбрасывался и, казалось, заранее ставил крест на своей научной карьере, предпочитая разносторонность профессионализму. Следующая его работа, также высоко оцененная, была посвящена свойствам щелочей, а диссертация, за которую он получил звание доктора философии, — медицине (как и у Кратценштейна).

Наступило новое столетие. В вихре французской революции, на полях сражений американской войны за независимость рождалось новое восприятие мира, очищение умов и душ от устоявшихся догм, ветер свободы манил молодых. Начавшийся промышленный переворот затопил традиционный мир техники нескончаемым потоком новых практических изобретений. Век XIX заявил о себе новым образом жизни и мыслей, новыми социальными и политическими идеями, новой философией, новым восприятием искусства и литературы. Все это захватывает Ганса, он стремится попасть туда, где бурлит жизнь, где решаются главные научные и философские вопросы, — в Германию, Францию, другие европейские страны. Дания была в этом смысле провинцией

Европы, и Эрстед не мог и не хотел там оставаться. Он искал понимания, он искал новых друзей.

Его талант, упорство и случайность сплелись в счастливый клубок, и вот он, блестяще защитив диссертацию, едет по направлению университета на годичную стажировку во Францию, Германию, Голландию. В то время он скорее был философом, чем физиком. Его новые друзья — большей частью философы. Много времени он провел в Германии. Там он слушал лекции Фихте о возможностях исследований физических явлений с помощью поэзии, о связи физики с мифологией. Ему нравились лекции Шлегеля, но Эрстед не мог согласиться с ним в необходимости отказа от непосредственного, экспериментального исследования физических явлений. Его поразил Шеллинг, как ранее поразил Гегель. Его увлекла идея о всеобщей связи явлений, он увидел в ней оправдание и смысл своей кажущейся разбросанности — все изучавшееся им оказывалось, по этой философии, взаимосвязанным и взаимообусловленным. Он стал одержим идеей всеобщей связи. Связи всего со всем. Быстро нашлась и родственная душа, мыслящая так же, как он, столь же разносторонняя и романтическая. Это был физик Риттер, изобретатель аккумулятора, гениальный фантазер, источник сумасброднейших идей. В одном из писем Эрстеду Риттер, в частности, высказал такую мысль: годы максимальных наклонов эклиптики, по его мнению, соответствовали годам самых крупных открытий в области электричества. Так, 1745г. отмечен изобретением лейденской банки, в 1746г. Вильке изобрел электрофор, в 1782г. появился конденсатор Вольты, а в 1801г. — вольтов столб. "Вы можете теперь вычислить, — писал Риттер, — что эпоха новых открытий наступит в 1819 или 1820 году, и мы сможем стать ее свидетелями". Иногда такие предсказания сбываются, хотя и не в полной мере. Это предсказание сбылось, открытие произошло в 1820г., сделал его Эрстед, но Риттеру не пришлось быть свидетелем этого. Он умер в 1810г.

Идея всеобщей связи не давала Эрстеду покоя. Необычайная энергия, свойственная ему с детства, вела его к новым и новым поискам. В 1813г. во Франции выходит его труд "Исследования идентичности химических и электрических сил". В нем Эрстед впервые высказывает идею о связи вольтова электричества и магнетизма. Он пишет: "Следует испытать, не производит ли электричество... каких-либо действий на магнит..." Его соображения были — простыми: электричество рождает свет — искру, звук — треск, наконец, оно может производить тепло — проволока, замыкающая зажимы лейденской банки, нагревается. Не может ли электричество производить магнитных действий? Говорят, Эрстед не расставался с магнитом. Этот кусочек металла должен был заставлять его думать.

Идея связи электричества и магнетизма носилась в воздухе, и многие лучшие умы Европы были ею увлечены. Еще Франц Ульрих Теодор Эпинус подмечал их сходство, а француз Франсуа Араго потратил много лет для сбора таинственных, на первый взгляд, историй о кораблях, сокровищах и необычных небесных явлениях, в которых он тоже видел эту ускользающую связь.

Однажды на рейде Пальмы, главного порта Майорки, появилось французское военное судно "Ля-Ралейн". Состояние его было настолько жалким, что корабль едва дошел до причала. Когда команда сошла на берег и уступила палубу нескольким именитым французским ученым, в том числе двадцатидвухлетнему Араго, выяснилось, что корабль разрушен молнией. Пока члены комиссии осматривали судно, покачивая головами при виде обгоревших мачт и надстроек, Араго поспешил к компасам и там увидел примерно то, что ожидал: стрелки компасов указывали в разные стороны...

Через год, копаясь в том, что еще несколько дней назад было генуэзским судном (оно разбилось, наскочив на скалы вблизи берегов Алжира), Араго снова обнаружил, что стрелки компасов размагничены. В кромешной тьме южной туманной ночи капитан, направив по компасу судно к северу, подальше от опасных мест, на самом деле неудержимо двигался к тому, чего так старательно пытался избежать. Корабль шел к югу, прямо на скалы, обманутый пораженным молнией магнитным компасом...

Все эти, на первый взгляд, малозначащие и не связанные между собой факты Араго собирал не зря. Молния — это гигантская электрическая искра! Сейчас нам трудно почувствовать сенсационность такого утверждения, но в то время многие простые люди, не то что ученые, восторженно приветствовали открытие Франклина: оно открывало путь в область новых "серендипити" — открытий на каждом шагу. Араго, собравший множество фактов, свидетельствующих о связи молнии с магнетизмом, чувствовал, что он на пороге нового открытия.

Радость и досада — вот, возможно, те чувства, которые он испытал, когда узнал решение долго не дававшейся ему задачи, решение, найденное Эрстедом.

Историки науки, возможно, еще долго будут оставаться в неведении и недоумении относительно обстоятельств этого странного открытия, которое стало чуть ли не классическим примером счастливой случайности.

Не ясна даже дата открытия. Одни исследователи относят его к 1819г., другие — к 1820. Кое-кто сомневается даже в авторстве Эрстеда. Действительно, обстоятельства открытия дают возможность для кривотолков. 15 февраля 1820г. Эрстед, уже заслуженный профессор, читал студентам лекции по физике. На лабораторном столе находились вольтов столб, провод, замыкающий его, зажимы и компас. В то время, когда Эрстед замыкал цепь, стрелка компаса вздрагивала и поворачивалась по направлению к проводу. Это было первое непосредственное подтверждение связи электричества и магнетизма. Это было то, что так долго искали все европейские и американские физики. Решение проблемы было потрясающе просто.

Казалось бы, все ясно. Эрстед продемонстрировал студентам еще одно подтверждение своей давнишней идеи о всеобщей связи разнородных явлений. Но почему же возникают сомнения, почему вокруг этого события впоследствии разгорелось так много жарких споров? Дело в том, что студенты, присутствовавшие на лекции, рассказывали потом совсем другое. По их словам, Эрстед хотел продемонстрировать на лекции всего лишь интересное свойство

электричества нагревать проволоку, а компас оказался на столе совершенно случайно. И именно случайностью объявили они то, что компас лежал рядом с этой проволокой, и совсем случайно, по их мнению, один из зорких студентов обратил внимание на поворачивающуюся стрелку, а удивление профессора, по их словам, было неподдельным. Сам Эрстед в своих позднейших работах писал: "Все присутствующие в аудитории — свидетели того, что я заранее объявил о результате эксперимента. Открытие, таким образом, не было случайностью, как бы хотел заключить профессор Гильберт из тех выражений, которые я использовал при первом оповещении об открытии".

Следует сказать, что отклонение стрелки компаса в лекционном опыте было весьма незначительным, и поэтому в июле 1820г. Эрстед снова повторил эксперимент, используя более мощные батареи. Эффект был значительно сильнее, причем тем сильнее, чем толще проволока, которой он замыкал контакты батареи. (Чем больше диаметр проволоки, тем меньше ее сопротивление и, стало быть, больше ток короткого замыкания.) Кроме того, он выяснил одну странную вещь, не укладывающуюся в ньютоновские представления о действии и противодействии. Выражаясь его же словами, "магнитный эффект электрического тока имеет круговое движение".

Чем же был поражен ученый? Почему в своем четырехстраничном памфлете он тщательно перечисляет свидетелей, не забывая упомянуть ни об одной из их заслуг? Среди них "Лауриц Эсмарх — видный ученый; министр юстиции, достойный человек Влейкель — кавалер ордена Дании; удостоенный высочайших наград Гаук, чье знакомство с естественными науками прославлено в стране, Рейнхард, профессор естественной истории; Якобсон, профессор медицины, человек, обладающий высочайшим мастерством проведения экспериментов; опытный химик Цейзе, доктор философии..."

Дело в том, что Эрстед, трактуя эксперимент, заронил глубокую мысль, мысль о вихревом характере электромагнитных явлений. "Вихреобразность" процесса, вызывающего в памяти водоворот, вихрь, спираль, долго не находила сторонников, и даже Фарадей поначалу не оценил эту мысль. Он еще долго был убежден в том, что силы, действующие между проводниками с током и магнитной стрелкой, — это силы притяжения и отталкивания, подчиняющиеся законам Ньютона.

Опыт Эрстеда доказывал не только связь между электричеством и магнетизмом. Не напрасно Эрстед в своем памфлете перечисляет свидетелей. То, что открылось ему, было новой тайной, не укладывающейся в рамки ньютоновских законов и прямо нарушающей третий из них: направления возмущающей силы — электричества (определяемого направлением провода) и силы реакции — магнетизма (определяемого направлением магнитной стрелки) были у Эрстеда перпендикулярны. Ученые, сгрудившиеся у лабораторного стола Эрстеда, впервые видели "противодействие", не противоположное по направлению "действию".

Памфлет Эрстеда вышел в свет 21 июля 1820г. Мы не случайно точно указываем дату. Дальнейшие события развивались в весьма непривычном для

неторопливой тогда науки темпе. Уже через несколько дней памфлет появился в Женеве, где в то время находился с визитом Араго. Первое же знакомство с опытом Эрстеда показало ему, что найдена разгадка задачи, над которой бился и он, и многие другие. Впечатление от опытов было столь велико, что один из присутствующих при демонстрации поднялся и с волнением произнес ставшую впоследствии знаменитой фразу: "Господа, происходит переворот..."

Араго возвращается в Париж потрясенный. На первом же заседании Академии, на котором он присутствовал сразу по возвращении, 4 сентября 1820г. он делает устное сообщение об опытах Эрстеда. Записи, сделанные в академическом журнале рукой протоколиста, свидетельствуют, что академики просили Араго уже на следующем заседании, 11 сентября, т.е. через неделю, показать всем присутствующим опыт Эрстеда.

Сообщение Араго слушал и внезапно побледневший академик Ампер. Он, должно быть, почувствовал в тот момент, что пришла его пора перед лицом всего мира принять из рук Эрстеда эстафету открытия. Он долго ждал этого часа, успел состариться, превратиться из юноши в солидного профессора. И вот час пробил — 4 сентября 1820г. Ампер понял, что должен действовать. Через две недели он сообщил о рождении электродинамики.

После открытия почести посыпались на Эрстеда как из рога изобилия: он был избран членом многих авторитетнейших научных обществ, в том числе Лондонского Королевского общества и Академии Франции, англичане присудили ему медаль Копли, а из Франции он получил давно заслуженный им приз в 3000 золотых франков, некогда назначенный Наполеоном для авторов самых крупных открытий в области электричества.

Принимая все эти почести, Эрстед никогда не забывал о том, что новый век требует нового подхода к обучению. Он основал в Дании общество для поощрения научных занятий. Польщенный европейской славой Эрстеда, король Фредерик VI пожаловал ему Большой крест Данеборга — высшую награду и, кроме того, разрешил основать Политехнический институт. В те же годы Эрстед организует литературный журнал, читает просветительские лекции для женщин, покровительствует "маленькому Гансу Христиану", своему тезке, будущему великому писателю Гансу Христиану Андерсену. Он совершает десятки заграничных поездок, блестяще овладевает немецким, французским, английским, латинским языками, на которых он читает лекции о науке и литературе. Эрстед становится национальным героем.

Он скончался 9 марта 1851г. Хоронили его ночью. Толпа из двухсот тысяч человек, освещая путь факелами, провожала своего героя в последний путь. Звучали траурные мелодии, специально сочиненные в его память. Ученые, правительственные чиновники, члены королевской семьи, дипломаты, студенты, горожане восприняли его смерть как личную потерю. За многое они были благодарны ему. И не в последнюю очередь за то, что он подарил миру новые тайны.



## Железо обзаводится "помощником"

До XVIII века слова "магнит" и "железо" были синонимами. Затем на авансцену уверенно вышел электрический ток, он стал хозяином положения. А железо? Уже "мягкое", а не "жесткое", оно превратилось в своеобразный усилитель магнитного поля, повышая его в сотни раз!

Мало кому заметный, но поистине радикальный переворот от железа к железу с током совершился в 20-е годы прошлого столетия в лабораториях ученых.

После опубликования памфлета Эрстеда многие заинтересовались проблемами электромагнетизма: в том же 1820г. Араго продемонстрировал проволоку с током, облепленную железными опилками, а Ампер доказал, что спираль с током — соленоид — обладает всеми свойствами природного магнита, притягивая мелкие железные предметы.

Что касается первого электромагнита, т.е. катушки, обтекаемой током и содержащей внутри железный сердечник, то его изобретения пришлось ждать еще пять лет. Это устройство создал Вильям Стерджен.

Он родился в Ланкастере в 1783г. в семье сапожника. Отец не уделял семье ни малейшего внимания; он наслаждался жизнью, удил рыбу и слыл большим любителем петушиных боев. Молодого Вильяма послали учиться мастерству к сапожнику, и тот, по-видимому, держал его в черном теле. Вильям голодал, и поэтому, как только представился случай, сбежал от сапожника в воинскую часть. Было ему в то время девятнадцать лет. Через два года Вильям дослужился до артиллериста, он много читал, ставил физические и химические опыты.

Однажды, когда их часть стояла на острове Ньюфаундленд, налетел страшный ураган, сопровождавшийся молниями и громом. Ураган произвел на Вильяма неожиданно сильное впечатление и привлек его внимание к электричеству. Он стал читать книги по естествознанию, однако вскоре с горечью понял, что ничего в них не понимает. Тогда он решил начать с самых азов и занялся письмом, чтением и грамматикой. Сержант тон же части снабжал его книгами, которые Вильям, освободившись от вахты, читал по ночам. Вскоре он перешел к математике, мертвым и новым языкам, оптике и естествознанию. Его страстью в свободное время было ремонтировать часы и чертить.

После освобождения от воинской службы в 1820г. Стерджен купил токарный станок и посвятил себя изготовлению физических приборов, в частности электрических. Благодаря поддержке известного тогда химика Джеймса Марша он был назначен лектором в Военную академию Ост-Индской компании в Аддискомбе, где и преподавал до 1838г.

Первым вкладом Стерджена в науку стала разработка им модифицированной модели вращающихся цилиндров Ампера, описанной в "Философском журнале" в 1823г. На следующий год он написал четыре статьи по термоэлектричеству, а 23 мая 1825г. представил Обществу искусств несколько усовершенствованных приборов для электромагнитных экспериментов, среди которых был ставший теперь знаменитым первый электромагнит. Идея цилиндричес-

кого и подковообразного магнитов захватила его еще в 1823г. Тогда Стерджен и построил вращающееся "колесо Стерджена" — фактически одну из первых модификаций электромотора.

Стерджен сделал ряд очень важных открытий, о которых написал несколько статей, однако "Философский журнал", для которого они предназначались, отказался их печатать, и Стерджену не оставалось ничего, как создать свой собственный журнал — "Анналы электричества".

Музей науки в Манчестере, директором которого стал Стерджен в 1840г., был слишком научным, чтобы быть прибыльным, и Стерджен жил в бедности. В 1850г. изобретатель электромагнита умер, так и не получив в награду за свое великое изобретение ни богатства, ни славы.

Ученик Стерджена, знаменитый английский физик Джеймс Прескотт Джоуль, писал, что Стерджен был высокого роста и хорошо сложен, обладал благородной внешностью и приятными манерами. К сожалению, портрета его не сохранилось. На его могильной плите выбито: "Здесь лежит изобретатель электромагнита..."

Первый в мире электромагнит, продемонстрированный Стердженом 23 мая 1825г. Обществу искусств, представлял собой согнутый в подкову лакированный железный стержень длиной 30 и диаметром 1,3 см, покрытый сверху одним слоем изолированной медной проволоки. Электроэнергией он снабжался от гальванической батареи (вольтова столба). Электромагнит удерживал на весу 3600 г и значительно превосходил по силе природные магниты такой же массы. Это было блестящее по тем временам достижение.

Сам Стерджен особенно высоко оценивал свою идею, связанную с заменой жесткого железа мягким. Ученый свободно оперировал такими понятиями, как "магнетизм", "магнитная энергия", "однородность магнитного материала", "отжиг железа" и т.д.

Правление общества оценило заслуги Стерджена. Он получил медаль и денежную премию, а первый электромагнит был выставлен в музее общества.

Джоуль, экспериментируя с самым первым магнитом Стерджена, сумел довести его подъемную силу до 20 кг. Это было в том же 1825г.

В 1828г. лондонский часовой мастер Воткинс изготовил электромагнит, который поднимал 30 кг.

Тогда же профессор Молл из Утрехта, взяв за основу конструкцию Воткинса, изготовил магнит, "поднимавший наковальню массой 60 кг и не поднимавший наковальню массой 80 кг".

В 1832г. Стерджен изготовил магнит, поднимавший 160 кг, но уже в том же году Марш создал магнит, способный поднять более 200 кг. Однако Стерджен не собирался терять первенства. По его заказу в 1840г. был выполнен электромагнит, способный поднять уже 550 кг!

К тому времени у Стерджена нашелся очень сильный соперник за океаном. В апреле 1831г. профессор Йельского университета Джозеф Генри (его именем названа единица индуктивности) построил электромагнит массой около 300 кг, поднимавший около 1 т.

Все эти магниты по конструкции представляли собой подковообразные стержни, обмотанные проволокой. Джоуль в ноябре 1840г. создал магнит собственной конструкции, в виде толстой стальной трубы, разрезанной вдоль оси. Сечение этого магнита было очень большим, магнит оказался компактным и поднимал 1,3 т. В то же время Джоуль построил магнит совершенно новой конструкции — притягиваемый груз испытывал действие не двух полюсов, как обычно, а значительно большего количества, что позволило резко увеличить поднимаемый груз. Магнит массой 5,5 кг удерживал груз массой 1,2 т.

Сейчас трудно себе представить, насколько тяжело было тогда создавать электромагниты. Ведь даже закон Ома инженерам в то время не был известен.

Когда немецкий учитель Георг Симон Ом положил на стол ректора Берлинского университета свою диссертацию, где впервые был сформулирован закон, без которого невозможен ни один электротехнический расчет, он получил весьма резкую отповедь. Электричество-де не поддается никакому математическому описанию, так как "электричество — это собственный гнев, собственное бушевание тела, его гневное Я, которое проявляется в каждом теле, когда его раздражают". Ректором Берлинского университета был в те годы Георг Вильгельм Фридрих Гегель.

Первые магниты были сделаны "как бог на душу положит". Однако не любая форма давала хороший результат. Случайно получилось так, что Стерджен для своего первого магнита выбрал очень удачную — подковообразную — форму (подковообразные магниты изготавливают до сих пор). Отсутствие опыта и элементарной методики расчета магнитов привело к тому, что некоторые разновидности магнитов, предложенные в то время, были бы, на наш взгляд, просто абсурдными. Так, трехлапый магнит не мог бы успешно работать, так как магнитные потоки каждого стержня противодействовали бы друг другу — поток одного стержня замыкали на втором стержне, где он действовал навстречу потоку этого стержня.

Негодной, на современный взгляд, оказывается и очень часто использовавшаяся конструкция, один магнит в которой составлен из трех более мелких и намотанных отдельно. Ясно, что в промежутках между этими маленькими магнитами магнитные поля двух соседних стержней взаимно уничтожаются.

Лабораторные магниты того периода изготавливались "на глазок". Никакой теории, которая позволила бы заранее предсказать свойства магнитов, не существовало. Первый вклад в теорию расчета электромагнитов внесли русские ученые Э.Х. Ленц и Б.С.Якоби, указавшие на связь подъемной силы электромагнита и произведение силы тока в катушках на число витков обмотки.

После Ленца и Якоби крупный вклад в теорию расчета магнитов внесли англичане братья Гопкинсоны, которые предложили метод учета насыщения — явления, давно замеченного проектировщиками магнитов и заключающегося в том, что в магните заданной формы после некоторого предела увеличением тока в катушках нельзя повысить его подъемную силу. Современная теория связывает это явление с тем, что при достижении некоторого намагничиваю-

шего тока элементарные магнетики (диполи) железа (ферромагнетика), ранее расположенные беспорядочно, в основном ориентированы в одном направлении и при дальнейшем усилении намагничивающего тока существенного увеличения числа магнетиков, ориентированных в одном направлении, не происходит. Насыщение стало привело к тому, что индукция магнитного поля первых магнитов не превышала 2 Тл.

Наступила новая эра усиления мощности магнитов, но не путем увеличения их размеров, а посредством совершенствования их формы и борьбы с насыщением.

Нельзя сказать, чтобы эта борьба была очень успешной. За сто лет этой напряженной войны физиков с непокорной "насыщающейся" сталью индукция магнитного поля в магнитах возросла всего лишь в два с половиной раза. Над этой проблемой работали многие видные физики и электротехники.

Что могли физики противопоставить природе? Только очень точный учет и полное использование природных свойств материалов. И вот появляются магниты с короткими коническими полюсами, массивными стальными магнитопроводами и громадными катушками.

Масса магнитов быстро увеличивается — теперь в большей степени за счет катушек. Если в 1881г. самый большой в мире лабораторный магнит весил около 1 т, то в 1930г. — уже около 120т.

Первым отметку "5 Тл" пересек в 1903г. магнит профессора Грея в Глазго. Ему удалось это сделать, применив мощные катушки, близко придвинутые к коническим полюсам.

Интересная идея была высказана французским ученым Перро в 1914г.: он предложил кроме двух обычных катушек, расположенных на полюсах, использовать третью, охватывающую собой рабочую зону машин. Индукция магнитного поля магнита Перро достигла 5,1 Тл. К 1914г. профессор Беккерель (младший) в Парижском музее естественной истории создал магнит, индукция магнитного поля которого возросла до 5,5 Тл, три других самых мощных магнита того времени — Вейсса в Цюрихе, Кайзера в Бонне и Эймса в США — работали на уровне 4,5 Тл.

Следует отметить, что создание Беккерелем магнита с индукцией поля 5,5 Тл, было воспринято физиками всего мира как большая сенсация. "Гигантский", "мощнейший", — писали об этом электромагните газеты. Увеличение индукции магнитного поля лишь на 10% стоило многих трудов и ухищрений. Однако самое главное заключалось в том, что для изготовления полюсов магнита был использован новый материал — сплав железа с кобальтом, который насыщается при индукции на несколько процентов большей, чем ранее применяемые материалы. Потребляя мощность 22 кВт, электромагнит в междуполюсном промежутке создавал поле, магнитная индукция которого составляла 5,5 Тл. При замене феррокобальтовых наконечников железными индукция полей снижалась до 5,2 Тл.

Если расстояние между полюсами было 2 мм и полезный объем 14 мм (т.е. объем, в который можно было поместить лишь небольшой образец), то

индукция магнитного поля достигла 5,9 Тл. Когда полезный объем был уменьшен до 0,5 мм (полюсы, по сути дела, соприкасались), индукция поля возросла до 6,5 Тл. Обмотка электромагнита состояла из тысячи витков медной трубки, по сечению которой шел ток, а по полости — охлаждающая вода. Магнит охлаждался так хорошо, что мог работать круглые сутки. Другие магниты, не имевшие искусственного охлаждения, не могли вследствие сильного нагрева работать подряд более 2 ч.

Беккерель хотел при помощи этого магнита уточнить некоторые неясности теории эффекта Зеемана. "Хорошо известно", — говорил Беккерель, — что в этом явлении есть еще кое-что непонятное — это "кое-что" вызвано недостатком зоркости наших инструментов" С помощью нового мощного магнита Беккерель хотел повысить эту "зоркость", сделать более отчетливыми неясные места теории.

Все физики могли видеть, с каким трудом были получены дополнительные 0,5 Тл, тем не менее некоторые из них полагали, что весь вопрос заключается в стоимости и размерах магнита. Сделать магнит колоссальным, вложить в него массу денег — и можно получить сколь угодно большое магнитное поле.

Надежду на то, что электромагнит гораздо большей мощности, возможно в 100 Тл, будет построен в ближайшие годы, выразили на Международном конгрессе электриков в 1914г. директор международного бюро мер и весов Гийом и профессор физики в Сорбонне Перрен. Они полагали, что по стоимости электромагнит будет равен мощному дредноуту (12... 14 млн. дол.) и потребует для создания нескольких лет.

Однако даже такой ценой не удалось бы повысить индукцию поля электромагнитов до 100 Тл или, что то же самое в единицах другой системы измерений (СГС) — до 1 млн. Гс. Даже сейчас такое стационарное поле — недостижимая мечта физиков. И виновно в этом не в последнюю очередь насыщение.

В 30-е годы в Белль-Ви, близ Парижа, вступил в строй самый большой из всех построенных ранее лабораторных магнитов. Этот магнит был создан Французской академией наук для изучения магнетизма. Кроме огромной массы он имел полюсные наконечники из особого сплава — пермендюра, обладающего несколько большей индукцией насыщения, чем сталь. Это позволило достичь большого поля. Но и оно составляло лишь 5,2 Тл при производстве силы тока на количество витков, равном 500 тыс. А. Длина магнита 630 см, высота 275 см, масса 120 т.

В 1934г. в университете шведского города Упсала вступил в строй новый мощный магнит. Он отличался от французского тем, что полюсы его имели значительно большую конусность, а катушки и сам полюс меньшую высоту. Этот электромагнит, рассчитанный Дрейфусом, оказался гораздо эффективней французского. Он весил всего лишь 30 т, но с его помощью при том же объеме можно было получить поле примерно 5,8 Тл. В этом магните полюсы притягивались с силой более 60 т.

С тех пор было построено много мощных электромагнитов, но парижский и упсальский до сего времени остаются рекордсменами — первый по массе, второй — по эффективности.

Сейчас почти в каждой физической лаборатории имеется электромагнит: магниты используются для изучения свойств веществ в сильных полях, для испытания новых материалов, в современных уникальных измерительных приборах, в квантовой электронике, при исследовании взаимодействия атомных частиц, для медицинских и биологических исследований. Они не поражают размерами, однако с их помощью можно получить в довольно значительном объеме поле 4...5 Тл, необходимое для исследований.

Самый впечатляющий и необычный исследовательский электромагнит, который никогда не был построен, предложил знаменитый американский изобретатель Томас Альва Эдисон. В начале 90-х годов прошлого столетия он предложил создать мощный приемник, который бы регистрировал электромагнитные процессы на Солнце. Проект заключался в следующем. В городе Огдене, штат Нью-Джерси, есть отвесная скала из магнитного железняка, масса которой не менее 100 млн. т. Если бы обмотать эту скалу большим количеством проволоки так, чтобы скала играла роль гигантского сердечника колоссального электромагнита, то с помощью этой обмотки, в силу ее большой индуктивности, можно было бы следить за изменением магнитного состояния Солнца.

В настоящее время, конечно, в таком датчике магнитного поля космических тел нет необходимости. Электромагнитные процессы на Солнце можно хорошо изучать с помощью радиотелескопов и других приборов, хотя и громоздких, но все-таки в несколько тысяч раз более легких и удобных, чем магнитная скала. Однако для своего времени идея Эдисона была удивительно смелой и передовой.

Капица: "краткость — сестра успеха?"

Электромагнит можно перегружать, если увеличить ток, обтекающий обмотку. Форсаж — это последний резерв на пути достижения сверхсильных полей, поэтому магнитные рекорды обычно принадлежат создателям импульсных систем.

Это направление берет начало от Вольта, который, заинтересовавшись электрическими рыбами, попробовал построить что-то подобное живой природе. Нильский сомик оказался слабым, гораздо лучше рыба "Торпедо" — гигантский электрический скат. Создавая разряд напряжением 50...60 В, он может убить зашедшего в воду теленка, электрический угорь Амазонки создает импульс напряжением до 500 В.

До Вольта уже были известны такие способы создания электричества, как натирание стекла шерстью, лейденская банка, нагрев турмалина. Сам Вольта научился электризовать жидкости кипячением и химическими реакциями, потом он построил вольтов столб, опустив два разнородных металла в едкую жидкость, однако этот источник не имел с "Торпедо" ничего общего, хотя изобретатель придал своей конструкции форму рыбы.

Потом природой электрического удара угря занялся Фарадей. 6 декабря 1838г. он доложил результаты опытов перед Королевским обществом. Фарадей использовал два металлических электрода, один конец которых касался рыбы, а к другому были присоединены медные проводнички. Они, в свою очередь, крепились к небольшому соленоиду — проволочной спирали, внутри которой помещалась железная проволока. Во время разряда угря соленоид создавал относительно сильное магнитное поле, которое намагничивало проволочку. По расположению магнитных полюсов проволочки Фарадей определял полярность напряжения рыбы. Этот эксперимент долго оставался экзотическим эпизодом в истории физики. И лишь много лет спустя всерьез начал заниматься изучением импульсных магнитных полей замечательный советский физик академик П.Л.Капица.

Петр Леонидович Капица родился в 1894г. в Кронштадте. Он окончил Петроградский политехнический институт и в 1921г. был послан в Лондон в составе первой советской научно-промышленной делегации. Петр Леонидович и не предполагал тогда, что долго проживет в Англии, создаст там собственную школу и превратится из скромного доцента в ученого с мировым именем. Большую роль во всем этом сыграл другой член делегации, известный физик А.Ф.Иоффе. Это он послал Капицу в Кембридж просить место в лаборатории знаменитого физика Э.Резерфорда. Однако Резерфорд заколебался: в его "сургушно-веревочной", хотя и блестящей ядерной лаборатории уже работало 30 стажеров. Говорят, что Капица тогда заметил: "30 и 31 различаются примерно на 3%; поскольку Вы всегда предостерегаете против рабской точности измерений, такая трехпроцентная разница вовсе не будет Вами замечена". Правильна ли эта версия, сказать трудно, но так или иначе Капица остался у Резерфорда (с условием не вести "красную пропаганду"), и вскоре скромный стажер, плохо знающий английский язык, стал близким к Резерфорду человеком, имеющим свою лабораторию. Вслед за Фарадеем Капица обратился к импульсным магнитным полям, задумав довести их до небывалой силы.

Вот история восхождения молодого советского физика в Кембридже, в Кавендишской лаборатории Резерфорда, описанная им самим в письмах к матери О.И.Капице.

"12 августа 21-го года.

...Вчера в первый раз имел разговор на научную тему с профессором Резерфордом. Он был очень любезен: повел к себе в комнату, показывал приборы. В этом человеке, безусловно, есть что-то обаятельное, хотя порою он и груб".

"1 ноября 21-го года.

...Результаты, которые я получил, уже дают надежду на благополучный исход моих опытов. Резерфорд доволен, как передавал мне его ассистент. Это сказывается на его отношении ко мне. Когда он меня встречает, всегда говорит приветственные слова. Пригласил в это воскресенье пить чай к себе, и я наблюдал его дома. Он очень мил и прост... Но... когда он недоволен, только держись, так обложит, что мое почтение".

Для изучения свойств альфа-частиц П.Л.Капица предложил помещать камеру Вильсона в магнитное поле. В нем траектория заряженной частицы искривляется, причем радиус искривления зависит от импульса частицы.

"29 ноября 1922-го года.

Для меня сегодняшний день до известной степени исторический... Вот лежит фотография — на ней только три искривленные линии — полет альфа-частицы в магнитном поле страшной силы. Эти три линии стоили профессору Резерфорду 150 фунтов стерлингов, а мне и Эмилю Яновичу — трех с половиной месяцев усиленной работы. Но вот они тут, и в университете о них все знают и говорят. Странно: всего три искривленные линии! Крокодил очень доволен этими тремя искривленными линиями. Правда, это только начало работы, но уже из этого первого снимка можно вывести целый ряд заключений, о которых прежде или совсем не подозревали, или же догадывались по косвенным фактам. Ко мне в комнату — в лабораторию — приходило много народу смотреть три искривленные линии, люди восхищались ими..."

"4 декабря 1922-го года.

Я эти дни был что-то вроде именинника, 2-го в субботу был прием у проф. Дж. Томсона по случаю приезда голландского физика Зеемана. Конечно, надо было напялить смокинг. Я говорил с Зееманом, и меня представляли примерно таким образом, что это, дескать, такой физик, который решает такие проблемы, которые считаются невозможными (для решения). И эти генералы меня трепали около 20 минут, пока я не ушмыгнул в угол... Сегодня Зееман и лорд Релей (сын) были у меня в лаборатории и смотрели мою работу..."

"15 июня 1923-го года.

Вчера был посвящен в доктора философии... Мне так дорого стоил этот миг, что я почти без штанов. Благо Крокодил дал взаймы, и я смогу поехать отдохнуть..."

Проведя серию экспериментов в магнитных полях до 43 тыс. Э (4,3 Тл), Капица решил распространить измерения на более сильные поля. Для этого необходимо было создать соленоиды, поле которых превышало бы прежнее примерно в 10 раз.

Основные трудности при создании сильных полей заключаются в том, что для этого необходим источник тока огромной мощности, кроме того, существует опасность разрушения соленоида при нагревании. Для решения этих проблем Капица предложил создавать сильные магнитные поля на очень короткое время в течение которого можно еще провести необходимые измерения и в то же время избежать разрушения соленоида.

Известно, что любая обмотка обладает тепловой инерцией: она не может мгновенно нагреться до температуры плавления даже под влиянием очень большого тока. В системах, работающих кратковременно, упрощается проблема источника сильного тока. Поэтому в качестве такого источника можно использовать устройства, способные дать мгновенный мощный разряд, следующий за относительно продолжительным периодом зарядки. Таких устройств довольно много. Можно, например, использовать электрическую энер-



гию, накопленную в конденсаторной батарее, работающей при разрядке практически в режиме короткого замыкания. Можно воспользоваться магнитной энергией, накопленной в магнитном поле трансформатора. По расчетам Капицы, для получения магнитного поля 50 Тл понадобится трансформатор с малым числом витков на вторичной обмотке, с сердечником длиной 2...3 м и диаметром 30...40 см.

Модельный эксперимент с использованием магнитного поля трансформатора был без промедления проведен П.Л.Капицей вместе с известным английским физиком П.М.С.Блэккетом. Эксперимент оказался неудачным. Выяснилось, что быстро механически разорвать первичную цепь трансформатора почти невозможно: при разрыве появляется дуга, и энергия намагниченного железа, вместо того чтобы обрушиться лавиной во вторичную цепь, возвращается в первичную и выделяется в дуге.

Конденсаторы также оказались непригодными, поскольку в то время они были весьма несовершенны и громоздки.

П.Л.Капица обратился к аккумуляторным батареям. Их тоже пришлось специально конструировать, поскольку необходимо было, чтобы их собственная емкость и активное сопротивление были бы минимальными. С помощью новых аккумуляторных батарей при их коротком замыкании удалось мгновенно получить ток 7 тыс. А и мощность 1000 кВт. Разряжая батарею на один из соленоидов с внутренним диаметром 1 мм, П.Л.Капица получил на 0,003 с (пока соленоид не разрушился) магнитное поле 50 Тл. С помощью этой батареи было испытано множество соленоидов самых разнообразных конструкций. В одном из соленоидов, навитом медной лентой, можно было проводить измерения в поле до 13 Тл. Когда же этот соленоид поместили на время опыта в жидкий азот, оказалось возможным проводить регулярные измерения в магнитном поле с индукцией 25 Тл. Это было тем максимумом, которого удалось в то время добиться с помощью аккумуляторов. Для получения больших полей необходимо было искать другой, более мощный источник электроэнергии, который должен был давать мощность порядка 50 тыс. кВт в течение времени, пока обмотка не нагреется до 150°C (тепловой предел электроизоляции), т.е. в течение 0,01 с.

В январе 1923г. в Лондоне П.Л.Капица познакомился с молодым советским инженером М.П.Костенко, в то время работавшим в Англии. Костенко, как и Капица, был инженером-электромехаником по образованию и окончил тот же Политехнический институт. Вскоре они подружились. Петр Леонидович предложил своим новым друзьям супругам Костенко вместе съездить в отпуск во Францию. Он помог им получить французские визы, и они вместе отпраздновали в Париже День взятия Бастилии.

Интересно, что в то время Костенко как раз занимался теми вещами, которые могли заинтересовать Капицу, — он разрабатывал, в частности, электромагнитный молот и электромагнитную пушку — специализированные электромеханические системы, важным элементом которых была электрическая машина, работающая в режиме короткого замыкания.

Для опытов Капицы нужны были большие токи на весьма небольшие моменты времени. И он подумывал о токах короткого замыкания. Костенко, уже работавший с генераторами, действующими в условиях коротких замыканий (электромагнитный молот), предложил использовать для этой цели большие всплески тока, возникающие при внезапном коротком замыкании синхронных генераторов. В качестве нового источника большой мгновенной мощности можно было взять быстроходный синхронный генератор, чтобы использовать в течение небольшого промежутка времени запасенную ранее электромагнитную и кинетическую энергию ротора.

Костенко мастерски подобрал параметры необходимого генератора, получив максимально возможные для машины заданных габаритов всплески тока и соответствующие магнитные поля.

Капица ознакомил с проектом руководителя Кавендишской лаборатории. Профессор Резерфорд высоко оценил идею эксперимента и даже предположил возможность создания с помощью "ударного генератора" магнитных полей порядка 700 Тл (!) и тем самым, воздействуя на внутреннее поле атома и заставив все электроны вращаться в одной плоскости, "сплющить атом".

Костенко и Капица стали соавторами предложенного ими устройства и получил 30 июня 1926г. английский патент. Импульсный генератор был изготовлен и с большим успехом испытан.

В качестве мощного источника тока П.Л.Капица и М.П.Костенко предложили использовать электрогенератор номинальной мощностью 2 тыс. кВт, который в режиме короткого замыкания не сгорал, как обычные генераторы, а выдавал без аварийных последствий в течение 0,01 с мощность 50 тыс. кВт. Этот генератор был построен фирмой "Метрополитен Виккерс" по расчетам М.П.Костенко, П.Л.Капицы и Майлса Уокера. Генератор приводился во вращение специальным электродвигателем, получавшим энергию от аккумуляторных батарей.

Масса ротора генератора составляла 2,5 т, диаметр его 50 см. Большой момент инерции ротора позволял обойтись без специального маховика. Генератор давал переменный ток, что было очень существенно, поскольку большой ток короткого замыкания был нужен лишь на небольшой промежуток времени. Если бы генератор давал постоянный ток, то по прошествии 0,01 с этот постоянный ток громадной силы должен быть выключен, а это само по себе — сложнейшая проблема. Переменный ток, как известно, два раза в течение каждого периода сам проходит через нулевое значение, и выключить генератор, когда ток проходит нулевое значение, не представляет особого труда. Нужно только строго синхронизировать момент прохождения тока через нуль с моментами включения и выключения генератора на короткое замыкание. Сделать это абсолютно точно невозможно: момент выключения может совпадать с таким временем, когда ток в обмотке еще не равен нулю. Поэтому П.Л.Капице "на всякий случай" пришлось сконструировать выключатель на ток 5 тыс. А (амплитуда тока 30 тыс. А), отключающий цепь за 0,0001 с. Этот выключатель сам по себе — подлинное произведение инженерного искусства.

Соленоид, на который обрушился колоссальный ток короткого замыкания генератора, представлял собой катушку из медной проволоки квадратного сечения. В последующих экспериментах медь была заменена сплавом меди с кадмием, обладающим большей механической прочностью при несколько повышенном электросопротивлении. Когда ток генератора проходил через катушку, в ней развивались грандиозные механические усилия, достигающие нескольких десятков тонн. Чтобы эти усилия не разорвали обмотку, она снаружи скреплялась прочной стальной лентой, воспринимающей усилия.

Это, однако, было не все. Под влиянием мощных сил катушка немного разматывалась, и концы ее отрывались от тех электровводов, через которые к катушке подавался ток. Катушка за катушкой "погибали" вследствие второстепенного явления уже после того, как были преодолены, казалось бы, все основные трудности. Устранение "мелочей" заняло несколько месяцев. Наконец решение было найдено. Капица создал обмотку, которая могла "дышать", т.е. автоматически расширяться. Один из контактов был сделан подвижным и сам после нескольких испытаний занимал то положение, которое ему "больше нравилось".

Другой серьезной трудностью была краткость времени, в течение которого можно было производить измерения. Ведь магнитное поле существовало в соленоиде всего 0,01 с, и за это время все эксперименты надо было начать и закончить. Кроме того, работу осложняли микроземлетрясения, происходящие при резком торможении генератора в тот момент, когда его обмотка замыкалась накоротко. Несмотря на то, что генератор был установлен на массивном фундаменте, покоящемся на скальном основании на виброустойчивой подушке, волна микроземлетрясения искажала результаты измерений. Чтобы этого не происходило, П.Л.Капица нашел весьма изящный выход. Он расположил соленоид с объектом исследования в другом конце зала на расстоянии 20 м от генератора. Волна землетрясения, движущаяся со скоростью звука в данной среде, проходила 20 м за 0,01 с и достигала соленоида уже к тому времени, когда измерения проведены.

В момент короткого замыкания температура в обмотке очень сильно повышается, а затем постепенно выравнивается. Расчеты показали, что эта температура должна превышать температуру Солнца. Это дало повод профессору Эддингтону шутливо заявить: "Работы П.Л.Капицы и Э.Резерфорда по расщеплению атома приводят к тому, что, хотя температура в глубинах звезд, быть может, равна миллионам градусов, эти глубины являются довольно прохладным местом по сравнению с Кавендишской лабораторией".

Вот что писал П.Л.Капица о своих опытах Резерфорду, находившемуся в то время в Каире.

"Кембридж. 17 декабря 1925г.

Я пишу Вам это письмо в Каир, дабы рассказать, что мы уже сумели получить поля, превышающие 270 тыс., в цилиндрическом объеме диаметром 1 см и высотой 4,5 см. Мы не смогли пойти дальше, так как разорвалась

катушка, и это произошло с оглушительным грохотом, который, несомненно, доставил бы Вам массу удовольствия, если бы Вы слышали его...

Но результатом взрыва был только шум, поскольку, кроме катушки, никакая аппаратура не претерпела разрушений. Катушка же не была усилена внешним ободом, каковой мы теперь намереваемся сделать.

...Я очень счастлив, что в общем все прошло хорошо, и отныне Вы можете с уверенностью считать, что 98 процентов денег были потрачены не впустую, и все работает исправно.

Авария явилась наиболее интересной частью эксперимента и окончательно укрепляет веру в успех, ибо теперь мы точно знаем, что происходит, когда катушка разрывается. Мы также знаем теперь, как выглядит дуга в 13 тыс. А. Очевидно, тут вообще нет ничего пагубного для аппаратуры и даже для экспериментаторов, если они держатся на достаточном расстоянии.

Со страшным нетерпением жажду увидеть Вас снова в лаборатории, чтобы в мельчайших деталях, иные из которых забавны, рассказать Вам об этой схватке с машинами".

С помощью импульсного генератора П.Л.Капице удалось провести планомерные исследования в магнитных полях до 32 Тл. Это поле, занимавшее объем всего 2 см<sup>3</sup>, стало верхней границей уверенно получаемого магнитного поля. Вплоть до этой границы Капица совместно с другими учеными исследовал явления Зеемана и Пашена — Бека, магнитосопротивление, магнитострикцию и другие эффекты.

Рассматривая перспективы получения еще более сильных магнитных полей, П.Л.Капица указывал в одной из своих статей, что уже в то время (в 20-е годы) состояние техники позволяло сделать конденсаторные батареи, которые могли бы создать поле 200...300 Тл. Однако технические трудности оказались столь велики, что только лишь через 40 лет таким способом удалось получить поля, о которых говорил П.Л.Капица.

Рекорды, поставленные П.Л.Капицей, оставались нетронутыми более 20 лет. Они были побиты лишь в 50-х годах.

Постепенно Капица убедил Резерфорда построить специальную лабораторию для исследований в сильных магнитных полях и при сверхнизких температурах. Резерфорд поддержал эти предложения и даже получил соответствующие средства. Решение вопроса сильно облегчалось тем, что авторитет Капицы в Кембридже уже был чрезвычайно высок — его избрали даже членом Лондонского Королевского общества, т.е. английским академиком.

И вот на древней кембриджской земле рядом со старыми корпусами колледжа поднялось современное, хотя и не слишком большое здание лаборатории имени Монда, директором которой был назначен П.Л.Капица.

Торжественное открытие состоялось в феврале 1933г. в присутствии премьер-министра Великобритании С.Болдуина и, разумеется, Э.Резерфорда.

Резерфорд был необычайно доволен и новым зданием, и его оборудованием, и особенно новым директором Монд-лаборатории. П.Л.Капица, по мысли

Резерфорда, должен был бы впоследствии стать его преемником и по Кавендишской лаборатории.

Н.Винер вспоминал: "...в Кембридже была все же одна дорогостоящая лаборатория, оборудованная по последнему слову техники. Я имею в виду лабораторию русского физика Капицы, создавшего специальные мощные генераторы, которые замыкались накоротко, создавая токи огромной силы, пропускавшиеся по массивным проводам; провода шипели и трещали, как рассерженные змеи, а в окружающем пространстве возникало магнитное поле колоссальной силы... Капица был пионером в создании лабораторий-заводов с мощным оборудованием... Сейчас, в связи с созданием атомной бомбы и развитием исследований по физике атомного ядра, такие лаборатории стали совершенно обычными".

Однако директором Монд-лаборатории П.Л.Капица пробыл недолго. Пришло время возвращаться на родину, надо было налаживать научную работу в Москве — создавать Институт физических проблем Академии наук СССР. Главными темами научных исследований этого института стали магнетизм и сверхнизкие температуры.

Обе эти проблемы должны были решаться комплексно, с участием физиков-экспериментаторов и физиков-теоретиков. Капица думал о том, что их работа в рамках единого института будет способствовать общему прогрессу исследований. По его замыслу здесь должны были работать первоклассные ученые, полностью отдавшие себя научному творчеству.

Однако Капица приехал в Москву, не имея ни сотрудников, ни научной школы. Готовых кадров не было. А может, это и неплохо — создавать новые направления и традиции.

Несколько лет заняло формирование и обучение основного и вспомогательного состава сотрудников, образование его ядра. В институте культивировалось служение науке. Руководство его также должно было участвовать в научном процессе. Капица не собирался отказываться от проведения собственных исследований. "Только когда работаешь в лаборатории сам, своими руками, проводишь эксперименты, пускай часто даже в самой рутинной их части, только при этом условии можно добиться настоящих результатов в науке, — писал он. — Чужими руками хорошей работы не сделаешь. Человек, который отдает несколько десятков минут для того, чтобы руководить научной работой, не может быть большим ученым. Я, во всяком случае, не видел и не слышал о большом ученом, который бы так работал, и думаю, что этого вообще быть не может. Я уверен, что в тот момент, когда даже самый крупный ученый перестал работать сам в лаборатории, он не только прекращает свой рост, но и вообще перестает быть ученым".

Наконец, институт укомплектован, в нем ведутся исследования... "Мне кажется, цель достигнута, и институт можно считать не только одним из самых передовых в Советском Союзе, но и в Европе", — писал радостный Капица.

На установке для получения сверхсильных магнитных полей кавендишцы — механик Пирсон и лаборант Лауэрман — помогали продолжать кембридж-

ские опыты. В одном из них был зафиксирован новый рекорд — получено импульсное магнитное поле в 50 Тл.

Мировая наука остро нуждалась в сверхсильных магнитных полях. Физики циклотронной лаборатории Гарвардского университета, например, мечтали о полях хотя бы 20 Тл, которые могли бы заметно искривлять траектории частиц, попадающих в толстые фотоэмульсии. Они использовали конденсаторные батареи.

Мощные конденсаторные батареи за 0,00001 с могли обеспечить получение электрической мощности 1 млн.кВт или 1 млрд.Вт (мощность Днепрогэса 600 тыс. кВт), удалось получить магнитное поле более 100 Тл. Внезапное высвобождение огромной энергии происходило с грохотом, напоминающим удар грома.

Вся эта лавина энергии загонялась в один-единственный массивный виток. Как показал П.Л.Капица, соленоиды обычного типа с намотанной на них медной проволокой, "выживают" лишь в полях до 30...35Тл. Соленоиды "биттеровского" типа, изготовленные из медных дисков, оказались устойчивее, но и они выдерживали магнитные поля не выше 50...70 Тл. Соленоиды не в состоянии противодействовать огромным усилиям, возникающим в таких полях. Особенно слабым местом казалась межвитковая изоляция. Чтобы от нее избавиться, пришлось перейти на один-единственный массивный виток, который вместе с держателем изготовили из меди, закаленной стали или бериллиевой бронзы.

Цель экспериментов — выяснить, насколько различные металлы могут противостоять механическим и тепловым воздействиям сверхсильных импульсных полей. Эксперименты показали, что ни один металл не может без разрушения выдержать усилия, возникающие в магнитном поле 100 Тл. казалось бы, этим и будут ограничены успехи физики сверхсильных полей. Однако современными учеными, по-видимому, найден выход из этого затруднительного положения. Он заключается в применении "бессиловых" обмоток, где используются принципы наложения противоположно направленных сил.

Разработано большое число бессиловых и малосиловых обмоток. Бессиловые обмотки — это последняя надежда физиков на получение устойчивых полей в неразрушающихся обмотках в том случае, если не будут открыты более прочные и тугоплавкие материалы.

Сильные магнитные поля при разрядке мощных конденсаторных батарей на биттеровский соленоид, иногда запеченный для прочности в керамику, или на отдельный виток сейчас широко используются для создания полей 20...70 Тл.

Значительным техническим достижением является создание в Институте атомной энергии имени И.В.Курчатова (С.Х.Хакимов с сотрудниками) соленоида нового типа, представляющего собой цельноточеную спираль из бериллиевой бронзы. Этот импульсный магнит создает в зоне диаметром 8 см магнитное поле 30 Тл.

А не существует ли способа получения сильного магнитного поля, основанного не на внезапном обрушивании на соленоид громадной энергии, а на каком-то ином принципе? Советские электротехники Г.А.Бабат и М.С.Лозинский в 1940г. опубликовали статью, в которой высказали идею о "концентраторе" потока.

Эту идею легко понять. Представим себе разрезанную трубку с током, со стороны разреза замкнутую металлическим поршнем. Внутри трубки ток создает магнитное поле, характеризующееся густотой магнитных силовых линий, т.е. числом их, приходящимся на единицу площади сечения внутренней области трубки. Что произойдет, если поршень внезапно ввести во внутреннюю область трубки? Внутреннее сечение трубки резко сократится. Так как число силовых линий, сцепленных с трубкой, мгновенно измениться не может, плотность их в уменьшившемся сечении столь же резко возрастет. Следовательно, возрастут и магнитная индукция, и напряженность магнитного поля.

Таким образом, принцип "концентрации" потока сводится к тому, что поле относительно небольшой напряженности создается сначала в большом объеме, затем сечение магнитного потока резко сокращают — поле резко возрастает.

Хаулэнд и Фонер, используя идею Г.А.Бабата и М.С.Лозинского, создали концентратор без механического сокращения рабочей зоны магнита. Выяснилось, что, поместив внутри соленоида массивный виток с небольшим внутренним диаметром, можно также добиться эффекта концентрации: при импульсе тока во внешней обмотке в массивном витке наводятся вихревые токи, которые вытесняют магнитный поток к центральному отверстию массивного витка. С помощью концентраторов получено магнитное поле 45 Тл, в то время как в соленоиде без массивного витка поле более 30...35 Тл получить весьма трудно.

В других экспериментах получено магнитное поле 20 Тл в значительном объеме (примерно равном объему стакана). В этот объем вставлялись толстые фотоэмульсии для исследования ядерных процессов. Батарея конденсаторов при этом имела массу более 30 т.

Вершиной, венчающей все исследования в области сверхсильных магнитных полей, явилась серия экспериментов, проведенных несколько лет назад советскими физиками под руководством академика А.Д.Сахарова.

Рассматривая идею концентрации магнитного потока и понимая, что эффект концентрации тем выше, чем быстрее произойдет "схлопывание" зоны концентрации, можно прийти к выводу, что этот эффект будет наиболее успешным в том случае, если схлопывание произвести с помощью взрывчатых веществ.

Если внутри замкнутого массивного витка каким-то образом создать магнитное поле, то затем, сжимая виток с помощью кумулятивного взрыва, можно добиться того, что плотность магнитного поля внутри суженного витка сильно возрастет. Это происходит в силу того обстоятельства, что магнитный поток, сцепленный с каким-то контуром, не может мгновенно изменяться. Аналогичные идеи были позже опробованы и американскими физиками в Лос-Аламосской лаборатории.

Устройство, использованное в советских экспериментах, схематически изображено на рис.6. Первоначальное магнитное поле 100 Тл создается при помощи устройства, также работающего на взрывном принципе. Металлическое кольцо-виток диаметром 7,5... 10 см окружают 4...8 кг взрывчатки. Когда внешнее поле достигает максимума, взрывчатку подрывают и кольцо за 0,000001 с, т.е. со скоростью 4 км/с, сужается до 0,4 см.

В процессе схлопывания советскими физиками было измерено магнитное поле 2500 Тл, а американскими — 1460 Тл. (Это рекордное магнитное поле было получено путем последовательного использования двух взрывных, или магнитокумулятивных, генераторов МК-1, МК-2. Второй из них использовался для создания "запального" поля, которое затем охлопывалось генератором МК-1.) Дальнейшие измерения поля были невозможны, поскольку во время схлопывания диаметр кольца уменьшался настолько, что оно раздавливало датчик, с помощью которого производили измерения. Весь процесс длился миллионные доли секунды.

А.Д.Сахаров считает, что достигнутое поле — не предел. Используя другие взрывчатые вещества, например ядерные заряды, можно получить магнитные поля, равные 10000 Тл. Такие поля существуют лишь в недрах планет и звезд. Давление магнитного поля растет пропорционально квадрату его напряженности, поэтому при достижении столь сильных полей будут развиваться и соответствующие давления.

Проведение экспериментов при одновременном сочетании столь сильного поля и давления имеет чрезвычайно большое значение для изучения, например, процессов, происходящих внутри планет и звезд, при гравитационном коллапсе сверхзвезд и т.п.

Применяют ли импульсные поля в технике? Перспективы технического использования импульсных полей весьма многообещающи, хотя эта область техники пока делает свои первые шаги.

С помощью магнитного импульсного поля, например, наклепывают защитную металлическую трубку на стальной трос. Давление, развиваемое импульсным полем, настолько велико, что трубка придавливается к негладкой поверхности троса с такой плотностью, какую невозможно получить другим способом.

Точно так же можно использовать электромагнитные усилия, возникающие в мощных магнитных полях, для штамповки деталей, запрессовки проводящих элементов в изоляционные втулки и других технических целей. Сверхсильные магнитные поля, по-видимому, найдут применение в дальней космической радиосвязи, при изучении элементарных частиц и свойств плазмы.

Быть может, наиболее грандиозный и смелый проект использования импульсных полей в физических исследованиях — проект, в котором предлагается применять крупный магнитокумулятивный генератор для получения заряженных частиц с колоссальной энергией. Чтобы разогнать частицы до энергии 10 эВ, в качестве заряда потребуется использовать ядерное устройство. Взрыв предполагается осуществить в камере объемом  $10^4$  м<sup>3</sup>, находящейся на



дне шахты глубиной 1 км. Удивительно, что это, казалось бы, безумно дорогое устройство должно быть значительно дешевле обычного ускорителя, дающего частицы с той же энергией.

### **Биттер: "секрет — в охлаждении"**

Когда Ампер согнул проволоку колечком, которое назвал соленоидом, ему достаточно было пропускать по виткам ток в несколько ампер, который нагревал проводник, но выделенное тепло легко отбиралось воздухом комнаты. Почти сто лет воздушный океан сообщал свою температуру проводникам, через которые пропускали электрический ток, но наконец пробил час, когда охлаждающих возможностей атмосферы оказалось недостаточно. И тут в истории магнитов уместно вспомнить имя Френсиса Биттера.

Биттер (1902... 1967) родился в городе Виховкин, в штате Нью-Джерси, в семье известного американского скульптора. Тогда Виховкин еще не был превращен в мрачный придаток громадного порта Нью-Йорка, а представлял собой раскинувшийся на живописных зеленых холмах открытый восточным теплым ветрам маленький городок. Казалось, все способствовало тому, чтобы Френсис стал скульптором: творчество отца, склонность к занятиям искусством, прекрасные каменоломни по соседству, наконец, большой спрос на могильные памятники.

Дом, где жил Френсис, был выстроен по проекту отца. Вся жилая площадь и двор с фонтанами и конюшнями (Френсис любил лошадей) были отгорожены от улицы высокой стеной.

В 1909г. семья переехала в Нью-Йорк. Впоследствии в своей книге "Магниты: курс для физиков" Биттер вспоминал: "Жизнь в нашей нью-йоркской студии была сравнительно размеренной. Жизнь детей подчинена строжайшему режиму. Мы изучали три языка: немецкий — с родителями, французский — с гувернанткой и английский — в школе. Уроки фортепьяно, танцев, посещение Музея естественной истории в дождливые дни, чтение "полезных" книг по воскресеньям — так проходила наша жизнь, пока я не был отослан двенадцати лет в школу". В это время погиб в такси, потерявшем управление, его отец, и мать тяжело переживала это несчастье.

"В моем образовании наука отсутствовала вообще, — писал Биттер, — хотя мы проходили восхитительные курсы алгебры и геометрии, которые я любил больше всего. Эти предметы легко давались мне, и, если я правильно вспоминаю, я был одним из лучших учеников в классе. Доказать теорему, исходя из постулатов, или решить уравнение — это было для меня волнующим переживанием, куда более интересным, чем латынь, история, английский и география".

Под влиянием дяди, профессора Чикагского университета, Биттер поступил в 1919г. в это учебное заведение. Он еще не интересовался наукой, но считался одним из лучших студентов, во всяком случае, одним из наиболее способных. Вершиной его активности в студенческие годы стала отнюдь не

научная работа, а организация для своих однокашников дешевой поездки в Европу на судне-скотовозе. И тут, в Вене, он впервые увлекся работами Эйнштейна и его теорией относительности.

В Чикагский университет Биттер не вернулся. Его привлек теперь Колумбийский университет, где он стал единственным студентом, избравшим для изучения небесную механику, учитывающую релятивистские эффекты. Интерес к этим проблемам Биттер сохранил на всю жизнь. Одна из его первых публичных лекций была посвящена теории относительности, преобразованиям Лоренца.

В 1925г. он стал бакалавром и поехал в Берлин доучиваться: "Я слушал много известнейших лекторов. Я слушал Макса Планка, отца квантовой теории; Макса фон Лауэ, который открыл рассеяние рентгеновских лучей в кристаллах; Альберта Эйнштейна. Я помню коллоквиум, на котором впервые было сообщено о волновой механике Эрвина Шредингера. Я ехал обратно в метро уже поздно ночью, когда внезапно заметил, что в вагон вслед за мной вошел Эйнштейн. Хотя я не был ему представлен формально, он, видимо, сразу узнал меня по коллоквиуму, так как сразу начал: "Слушайте, что Вы об этом думаете? В какое чудесное время мы живем!".

Возможно, именно эта встреча и определила научные интересы Биттера. Для начала он купил двухтомную "Теорию электричества и магнетизма" и проштудировал ее от корки до корки.

В 1926г. Биттер уже заканчивал докторскую диссертацию в Колумбийском университете, когда выяснилось, что тема диссертации была уже кем-то ранее досконально разработана. "И когда я бессмысленно шлялся по коридорам, мысленно взвешивал, какая другая тема могла бы потянуть на настоящее исследование, мой взгляд упал на внушительного вида магнит в одной из пустых лабораторий...", — писал впоследствии Биттер. Так один из наиболее знаменитых ученых-"магнитчиков" наших дней обратился к магниту.

На выбор Биттером научного направления оказал огромное влияние его визит в Кембридж, в магнитную лабораторию П.Л.Капицы. Однако это было только толчком. Биттер пошел своим путем в направлении создания не импульсных магнитов, а магнитов, предназначенных для длительной работы.

Во время войны Биттер обезвреживал магнитные мины, разбрасываемые немецкими самолетами-амфибиями вблизи английских портов. Это было необычное время для Биттера. Он жил в скромном "маленьком частном домике" на Арлингтонской улице в Александрии, близ Вашингтона, в атмосфере строгой секретности. Лишь в послевоенные годы Биттер стал заниматься "мегагауссной" тематикой — проектировал сверхсильные магниты.

В 1965г. он перенес тяжелую операцию, и врачи не могли сказать ничего утешительного. Однако он не сдался и продолжал работать, но уже над мощными разрядными импульсными магнитами. 26 июля 1967г. Биттер скончался, а 21 ноября 1967г. главная магнитная лаборатория США — Национальная магнитная лаборатория — была названа его именем.

В 30-е годы Биттеру для исследования тонких магнитных явлений в газах потребовалось сильное магнитное поле — примерно 10 Тл. Необходимо было в короткий срок создать магнит, который мог бы в течение длительного времени (несколько часов) обеспечить исследователю это грандиозное поле, в 200 тыс. раз превышающее магнитное поле Земли.

Перед тем как приняться за решение этой задачи, Биттер изучил все, что было до него сделано в области сильных магнитных полей.

В это время уже работали очень мощные электромагниты в Белль-Ви, близ Парижа (поле до 9 Тл), в Упсальском университете в Швеции (до 7 Тл). Это были громадные сооружения со стальным магнитопроводом и ярмом, классические магниты массой несколько десятков тонн. Нечего было и думать о том, чтобы создать магнитное поле 10 Тл с помощью электромагнита со стальным сердечником, хотя теоретически легко показать, что несмотря на "насыщение" в магнитных системах со сталью можно получить сколь угодно большое поле. Бесконечное поле будет в том случае, если вся Вселенная, за исключением точки, в которой создается магнитное поле, будет заполнена намагниченным железом...

Биттер прекрасно понимал, что для достижения поля 10 Тл ему придется заполнить насыщенным железом если не Вселенную, то уж во всяком случае свою лабораторию. Вариант с железным сердечником не подходил. Пришлось взяться за изобретенный французскими учеными Араго и Ампером электромагнит без стального сердечника, позже названный соленоидом. Он представляет собой спираль, обтекаемую электрическим током. Неприятности, которые подстерегали ученых на этом пути, были сформулированы французским электротехником Фабри в виде формулы — "формулы Фабри", опубликованной в журнале "Электрическое освещение" за 1898г.

О чем говорит формула? Об очень грустных вещах: если вы хотите увеличить магнитное поле, например, в 10 раз, извольте увеличить электрическую мощность, расходуемую в соленоиде, в 100 раз. Для достижения сильных магнитных полей потребуются целые электростанции. Академику П.Л.Капице, уже в 1923... 1927гг. получившему поле 50 Тл, не пришлось преодолевать эту трудность — он сумел создать сильное поле, продолжающееся во времени, лишь одну тысячную долю секунды. Но это не устраивало Биттера — ему нужны были стационарные поля. Выход был один — нужно строить соленоид.

Биттер отправился на Бостонскую электростанцию. Ему удалось договориться с руководством Эдисоновской электрической компании о том, что ночью, когда в городе будет некоторая свободная электрическая мощность, Биттер будет питать этой мощностью свое "прожорливое дитя". Магнит размером с автомобильное колесо был установлен в одном из помещений электростанции. Когда его включили впервые в 1937г., в зале случилось что-то невозможное: мелкая железная пыль, опилки, гвозди, болтики со всех концов помещения устремились к небольшому бронзовому кожуху, к которому были подведены две мощные водопроводные трубы. По ним подавалась охлаждающая вода из теплообменника, который омывался водой из реки, протекающей

поблизости. Роль этих труб очень большая. Если бы к магниту не подавалась охлаждающая вода со скоростью 50 л/с, то магнит мгновенно бы сгорел.

Потребляемая мощность магнита примерно равна 1700 кВт, или 1,7 МВт. Вся эта мощность выделялась в виде тепла, которое необходимо было тут же отводить во избежание повышения температуры магнита.

Конструкция Биттера оказалась настолько удачной, что до сих пор соленоиды, построенные по этому принципу, называют биттеровскими. Оригинальный биттеровский соленоид, с помощью которого впервые в течение длительного времени было получено магнитное поле 10 Тл, представлял собой штампованные медные диски с 600 отверстиями для охлаждающей воды, имевшие радиальную прорезь. Последняя служила для того, чтобы, немного изогнув диск, можно было присоединить его к следующему диску для образования непрерывной спирали с током.

Первый биттеровский соленоид с полем 10 Тл, будучи сильнейшим в мире, непрерывно работал "на науку". Единственным перерывом в его работе было время, когда для осуществления "манхеттенского проекта" (создание первой американской атомной бомбы) с помощью магнита Биттера в Ок-Ридже разделяли изотопы урана.

Бурное развитие физики в 60-е годы, особенно таких ее направлений, как магнитное удержание плазмы, исследования сверхпроводимости, антиферромагнетизма, квантовой оптики, элементарных частиц, привели к тому, что сверхсильные магнитные поля стали остро необходимы, и для их получения были организованы лаборатории и институты в Советском Союзе, США и Англии.

Достигнутое в 1965г. магнитное поле 25 Тл в полмиллиона раз больше земного, в 100 раз больше поля солнечных пятен и лишь в 4 раза уступает магнитному полю, которое, по расчетам, должно существовать в атомном ядре.

Поле 25 Тл достигнуто в Национальной магнитной лаборатории США с помощью тройного соленоида, созданного Кольмом по расчету Монтгомери. Этот рекордный соленоид с внутренним диаметром 10 см потреблял мощность 16 тыс. кВт. Его внешняя секция намотана полый медной шиной квадратного сечения, внутренние секции выполнены из медных дисков, на поверхности которых химическим способом вытравлены радиальные каналы для охлаждения. Для изготовления магнита использовано более 3 т меди. Давление магнитного поля на внутренние секции было так велико, что медь начала "течь". Это давление более чем в 3 раза превышало существующее на дне глубочайшей океанской впадины. Интересна система охлаждения магнита, основанная на принципе пленочного кипения. При этом температура охлаждаемой медной спирали была выше 100°C, что вызывало возникновение на ней многочисленных пузырьков пара, которые в течение тысячных долей секунды превращались в огромное количество сравнительно холодной воды, водопадом (Слово "водопад" здесь использовано не случайно. Для охлаждения этого магнита используется вода протекающей неподалеку от лаборатории реки. Тепло, выделяющееся в соленоиде, столь велико, что температура воды в реке на участке

ниже лаборатории повышается на полградуса.) обрушивающейся на соленоид. Удельная теплота парообразования воды очень велика, поэтому при образовании на поверхности спирали пузырьков от спирали отбирается гораздо более значительная энергия, чем та, которая отбиралась бы просто при нагревании охлаждающей воды. Этот принцип локального, или пленочного, кипения был впервые использован в небольшом магните Кольма, с помощью которого получено поле 12,6 Тл. По сравнению с соленоидом Биттера (поле 10 Тл) размером с колесо легковой автомашины этот магнит величиной с грейпфрут был просто крошкой.

Сходную систему охлаждения имеет еще один грандиозный магнит. Он был создан в Физическом институте АН СССР имени П.Н.Лебедева под руководством академика А.М.Прохорова научными сотрудниками Л.П.Максимо-вым и В.Г.Веселаго. Соленоид, напоминающий из-за множества шлангов-щупалец чудовищного осьминога, рассчитан на получение магнитных полей более 20 Тл. Чтобы снабжать это "чудовище" электроэнергией, построена специальная электростанция.

Колоссальное поле, полученное Кольмом в его магните на 25 Тл, создано в рабочей зоне диаметром всего 10 см, хотя размер магнита более 1 м в поперечнике. Проводить какие-либо крупномасштабные исследования на этом соленоиде довольно сложно, поэтому конструкторы искали новые пути, с помощью которых можно было бы получать значительные магнитные поля в больших рабочих объемах.

Может быть, использовать другое охлаждающее вещество? Интересный эксперимент был проведен в Калифорнийском университете. Там еще в 1959г. был построен соленоид, охлаждаемый керосином. Почему выбран керосин? Дело в том, что вода, особенно с примесями, не является идеальным изолятором, и по достижении некоторого напряжения начинают сказываться ее электрические свойства. Обмотка, охлаждаемая водой, подвергается коррозии. Анализ других жидкостей, которые можно было бы использовать для охлаждения, показал, что с точки зрения теплоемкости и безвредности наилучшим для обмотки является очищенный керосин, закупоренный в сосуде, наполненном нейтральным газом.

"Керосиновый" соленоид, имеющий внутренний диаметр 10 см, был намотан медной шиной, потреблял мощность 6 тыс. кВт и обеспечивал получение магнитного поля 10 Тл. Каждую секунду к нему для охлаждения подавался центнер очищенного керосина.

### **Оннес: "далее охлаждать некуда!"**

Этот пожилой человек с бледным лицом и уныло торчащими усами не производил впечатления героической личности, хотя он совершил не один научный подвиг. Он оживил "солнечный" газ — гелий, понизив его температуру почти до абсолютного нуля. Он открыл фантастические материалы —

сверхпроводники. Он первым создал столь технически оснащенную лабораторию, что она стала эталоном для грядущих лабораторий XX века!

Его звали Гейке Камерлинг-Оннес (1853...1926). Он учился у знаменитых Кирхгофа (правила Кирхгофа) и Бунзена (горелка Бунзена). На рубеже XIX и XX веков ему удалось создать в Лейденском университете лабораторию с невиданно мощными оживителями воздуха, азота и водорода, с сильным коллективом стеклодувов, со своим научным журналом.

Он знал, что делал. Еще в 1790г. Ван-Марум, директор музея в Гааге, первым в мире превратил газ аммиак в жидкость, кипящую при  $-33^{\circ}\text{C}$ ! Камерлинг-Оннес достойно отметил столетний юбилей соотечественника. Хотя со сжижением водорода его опередил Дьюар, но последний газ — гелий все же стал жидкостью у голландца (1908г.: при температуре  $-268^{\circ}\text{C}$ ; Нобелевская премия 1913г.).

Камерлинг-Оннес сжижал газы, чтобы выяснить, что же несут с собой все более низкие температуры. С температурой было все ясно — у нее было предельно низкое значение, а как с электрическим сопротивлением? Оно снижалось вместе с температурой. Формула Фабри давала надежду на получение поля примерно 100 Тл. Несколько лет труда — и сверхсильное магнитное поле должно покориться! Какая великая желанная цель!

Но исследователи недооценивали два обстоятельства: во-первых, низких температур достигать не так просто. Чтобы их получить, необходимо затратить значительную энергию; во-вторых, с ростом напряженности магнитного поля вследствие явления, называемого магнитосопротивлением, растет и электрическое сопротивление металла, причем при низких температурах эффект магнитосопротивления проявляется особенно сильно.

Академик П.Л.Капица в одной из своих статей представил результаты проверки идеи, предложенной в свое время известным французским ученым Перреном: охлаждать соленоиды жидким воздухом.

Вяснилось, что для охлаждения соленоида с магнитным полем 10 Тл, создаваемым в области диаметром 1 см, потребуется прокачивать через него 24 л/с жидкого воздуха. Для обеспечения работы соленоида пришлось бы построить завод по производству жидкого воздуха.

Может быть, в результате этих обстоятельств, а может быть, и по другим причинам, развитие низкотемпературных, но несверхпроводящих, или, как их иногда называют, криогенных магнитов сильно задержалось.

Первой попыткой использовать низкую температуру для снижения электрического сопротивления была постройка в 1961г. одного из самых больших в мире соленоидов на 10 Тл, выполненного из алюминия, охлаждаемого жидким неоном (температура кипения 27 К). Внутренний диаметр соленоида составил 30 см, длина 200 см, масса алюминиевых обмоток 5 т. Это один из самых больших соленоидов в мире. Он предназначался для термоядерных исследований и поэтому на концах имел "магнитные пробки", в которых напряженность магнитного поля достигала 20 Тл. Однако такой соленоид мог работать только

в течение 1 мин; за это короткое время весь запасенный в криостатах жидкий неон превращался в газ.

Сделано немало попыток создать большее магнитное поле, применив другие охлаждающие вещества (например, жидкий азот, жидкий водород) и другие материалы обмоток (например, натрий, запрессованный в тонкую стальную трубку). Результаты проведенных экспериментов были многообещающими, но превзойти достигнутое пока никто не смог.

Чаще всего такие магниты питаются от собственной энергетической установки, вырабатывающей постоянный ток мощностью несколько тысяч киловатт. Когда этой мощности недостаточно (как это получилось с рекордным соленоидом Кольма), на вал машин насаживают маховик. Накопив в нем достаточную энергию, можно, как это было сделано П.Л.Капицей, в течение короткого времени снимать с генераторов мощность, превышающую номинальную в несколько раз.

В настоящее время генераторы, предназначенные для кратковременного питания крупных электромагнитов, могут иметь массу роторов до нескольких сотен тонн.

В Королевском радарном центре Великобритании источником питания соленоидов служили мощные аккумуляторные батареи, снятые с подводной лодки.

В поисках новых путей Кольм разработал конструкцию соленоида, названного им гидромагнитом. Соленоид состоит из соосных труб, между которыми в радиальном направлении поступает какая-нибудь хорошо проводящая электричество жидкость, например жидкий натрий или жидкое серебро. Обе трубы помещены в небольшое магнитное поле. Поступающая жидкость пересекает силовые линии поля, и в ней наводится электродвижущая сила (ЭДС), под действием которой в жидкости начинает течь электрический ток, совпадающий по направлению с током, создающим поле возбуждения. Таким образом, сама жидкость становится обмоткой соленоида. Магнитное поле, которое можно получить с помощью этой "обмотки", зависит от скорости перемещения жидкости, ее электропроводности и значения поля возбуждения. Кольм рассчитал, что в гидромагните, наполненном расплавленным серебром, при температуре 1000°C в магнитном поле 6 Тл при расходуемой мощности 70 тыс. кВт и скорости поступления серебра 200 л/с можно получить магнитное поле 40Тл.

Однако, если отвлечься от прочих трудностей, достижение столь грандиозных полей приводит к тому, что материалы обмотки под действием давления магнитного поля начинают течь. В соленоиде Кольма на 25 Тл давление, как уже говорилось, в 3 раза превышает давление на дне глубочайшей океанской впадины. А давление растет пропорционально квадрату напряженности поля. При увеличении напряженности поля чуть больше чем в 3 раза давление возрастает в 10 раз.

При поле напряженностью 100 Тл магнитные усилия эквивалентны тем, которые развиваются в жерле пушки при выстреле. Держать такое поле — это

все равно, что задержать взорвавшийся в казенной части пушки снаряд таким образом, чтобы и снаряд не вылетел, и пушка не разорвалась.

А обязательно ли рост напряженности поля связан с ростом давления? Электромагнитная сила может быть рассчитана как векторное произведение плотности тока в обмотке на индукцию магнитного поля (это та же самая лоренцева сила, которая отклоняет частицы в ускорителях). Разработана конфигурация обмоток и соленоидов, в которых почти полностью отсутствуют усилия. Такие обмотки и соленоиды называют бессиловыми. Недавно была построена крупная бессиловая система для исследования термоядерных реакций, работающая на несколько ином принципе: в ней усилия с обмоток соленоида переносятся на массивную стальную несущую конструкцию.

При изучении вопроса о возможности создания бессиловых обмоток советские и американские ученые пришли к выводу, что эта проблема совсем не безнадежна.

Рассмотрим, например, обмотку, выполненную в виде длинной спирали с большим шагом. Такая обмотка создает два поля (поле, конечно, одно, но для удобства его часто раскладывают на осевую и радиальную составляющие, которые дают в сумме действительное поле): суммарное поле, направленное вдоль оси (осевое), и поле, окружающее каждую проволочку в отдельности (кольцевое). Осевое поле обмотки стремится разорвать ее; поле, окружающее обмотку, стремится ее сжать. Таким образом, усилия, направленные в разные стороны, взаимно уничтожаются.

Более приемлемой, возможно, окажется другая обмотка. Ее можно выполнить из нескольких слоев, причем обмотка во внутреннем слое почти параллельна оси, а во внешнем — почти перпендикулярна к ней. В такой обмотке переход от осевого поля к кольцевому осуществляется постепенно, и усилия сжатия распространяются равномерно на все слои. Эта система — прообраз мощных систем будущего, в которых магнитные поля колоссальной напряженности будут сочетаться с изяществом и ажурностью конструкции.

Логическим развитием тенденции охлаждения соленоидов стал уход в зону предельно низких температур. У Биттера охлаждение витков водой позволяло повысить пропускаемые по ним токи, ни о какой экономии энергии речи не было, ибо потери росли быстрее, чем ток. При низких температурах снижалось сопротивление проводников и вместе с ним выделение тепла током. Наконец, произошло невероятное событие — почти у абсолютного нуля ( $-273^{\circ}\text{C}$ ) электропроводность некоторых металлов росла до бесконечности! "Виновником" оказался Генке Камерлинг-Оннес.

В жизни Камерлинг-Оннеса ничто, казалось, не предвещало мировой славы. Известный ученый, опубликовавший в специальной литературе многочисленные работы по радиоактивности, термодинамике и сжижению газа, обладающий скорее инженерным складом ума, чем аналитическим. Но в 1911 г. одним весенним утром он вошел в лабораторию обычным заведующим кафедрой, а вышел первооткрывателем сверхпроводимости. Один день принес ему бессмертие. Вот как это произошло.



До того было неясно, как должно изменяться электрическое сопротивление металлов при снижении их температуры.

Ученые придерживались трех различных точек зрения:

Из классической теории электромагнетизма известно, что сопротивление проводника падает с уменьшением температуры. Объяснить это явление можно довольно просто. Электрический ток — это поток свободных электронов, проходящих сквозь кристаллическую решетку металла. При высоких температурах вследствие теплового колебания атомов кристаллической решетки вероятность столкновения электронов с решеткой велика. Это препятствует движению электронов и создает сопротивление току. При низких температурах, когда амплитуда колебаний атомов в решетке уменьшается, вероятность столкновения электронов с решеткой становится меньше и ток встречает, таким образом, меньшее сопротивление. При абсолютном нуле, когда решетка уже неподвижна, сопротивление проводника равно нулю.

Сопротивление току сохранится и при абсолютном нуле, поскольку и тогда некоторые электроны будут сталкиваться с решеткой, тем более что кристаллические решетки, как правило, не являются идеальными — в них всегда есть дефекты и включения примесей.

Сопротивления металлов при приближении температуры к абсолютному нулю должны возрастать, так как в силу конденсации электронов на решетке (грубая аналогия — образование капелек воды на холодной ложке, поднесенной к горячему чаю) их число при охлаждении непрерывно снижается, вследствие чего электропроводность (определяемая числом свободных электронов) уменьшается (электропроводность — величина, обратная удельному сопротивлению).

Действительно, трудно представить себе еще какой-нибудь вариант. Но... Весной 1911г. Камерлинг-Оннес заморозил ртуть в сосуде Дьюара, содержащем жидкий гелий. Затем он пропустил через ртуть ток и наблюдал за стрелками измерительных приборов, показывающих сопротивление, которое, как и следовало ожидать, постепенно снижалось по мере падения температуры. Такое соотношение между сопротивлением и температурой сохранялось до тех пор, пока температура не снизилась до 4,12 К. Внезапно электрическое сопротивление ртути исчезло; не осталось даже сопротивления, обусловленного столкновениями электронов с дефектами и примесями решетки.

Камерлинг-Оннес повторил эксперимент. Он взял очень загрязненную ртуть, у которой остаточное сопротивление, вызываемое примесями, должно быть очень явно выражено. Однако вблизи той же температуры (4,12 К) сопротивление ртути почти также внезапно исчезло. Как увеличить сопротивление столбика ртути, довести его до того значения, которое было бы зарегистрировано приборами? Очевидно, нужно увеличить длину столбика и уменьшить его сечение. Камерлинг-Оннес изготовил столбик ртути толщиной менее человеческого волоса и длиной 20 см. Измерив теперь сопротивление, он поразился: стрелки приборов не сдвинулись с места. Нуль.

Камерлинг-Оннес готовил еще один эксперимент с еще большей точностью измерений. Из ртути ученый изготавливает кольцо и подвешивает его горизонтально на тонкой нити. Если в таком кольце навести ток, выключив, например, находящийся поблизости электромагнит, нить закрутится на некоторый угол. Этот угол можно измерить с большой точностью, укрепив на нити зеркальце и прослеживая положение "зайчика". Если в кольце существует какое-нибудь сопротивление, ток в кольце будет постепенно затухать. Это приведет к ослаблению закручивания нити, и "зайчик" переместится. Камерлинг-Оннес проделявает этот опыт. "Зайчик" не трогается с места.

Это могло означать только одно — равенство нулю электрического сопротивления кольца, т.е. сверхпроводимость ртути при температуре, близкой к абсолютному нулю.

Камерлинг-Оннес понимал всю ответственность, которая ляжет на него, когда он объявит, что сопротивление было равно нулю, и много раз повторял измерения, все время повышая их точность. Опять нуль! Открыта сверхпроводимость!

Понадобилось, однако, более полувека для того, чтобы сверхпроводимость перестала быть исключительно лабораторным курьезом.

Наиболее известное и, видимо, ценное свойство сверхпроводников — отсутствие электрического сопротивления постоянному току.

Результаты прямых измерений говорят о том, что оно меньше сопротивления металлов при нормальной температуре по крайней мере в  $10^4$  раз.

Иногда спрашивают: "Неужели сопротивление сверхпроводников равно нулю? Может быть, оно просто очень мало, и мы не замечаем его лишь потому, что не обладаем совершенной измерительной техникой?"

Разрешить этот вопрос попытался американский ученый Коллинс. В марте 1954г. он возбудил ток в сверхпроводящем свинцовом кольце и наблюдал за значением этого тока. Если сопротивление, хотя бы ничтожное, есть, то ток все время будет уменьшаться, "затухать". Например, для уменьшения тока в серебряном кольце практически до нуля требуется всего лишь несколько десятых долей секунды. Как же затухал ток в кольце Коллинса? Измерения, произведенные в сентябре 1956г., показали, что в кольце Коллинса ток абсолютно не изменился, впоследствии этот же опыт проводился в течение 10 лет. Расчет показал, что ток, возбужденный в сверхпроводящей цепи, уменьшится на значение, которое можно зафиксировать, за время, не меньшее 100 тыс. лет.

Однако при исследовании затухания магнитного кольца внутри ниобий-циркониевой трубки (25% циркония) было найдено, что поток все-таки затухает. Это затухание происходит по логарифмическому закону — за первую секунду поток снижается на 1%, за следующие 10 с — еще на 1% и т.д. Полное затухание потока в этой трубке, т.е. снижение его до значения, которое уже нельзя измерить современными приборами, займет 10 лет. Это время в миллиарды миллиардов раз превышает время существования нашей Галактики. К результатам таких экспериментов следует, однако, подходить с осторожностью. Известно, что всякое кольцо, создающее магнитное поле, испытывает

силы, стремящиеся увеличить кольцо в размерах, попросту разорвать его. Увеличение диаметра кольца хотя бы на одну миллионную часть сразу же выразится в снижении поля, которое можно приписать наличию в сверхпроводнике электрического сопротивления.

Если первое основное свойство сверхпроводников — отсутствие сопротивления — было открыто в 1911г., то второе важнейшее свойство — лишь спустя 22 года. В 1933г. немецкие физики Мейснер и Оксенфельд обнаружили, что сверхпроводники — идеальные диамагнетики. Что это означает?

Мы постоянно находимся в магнитном поле Земли. Силовыми линиями этого поля пронизываются все предметы и существа на Земле. Если на пути силовых линий попадает какой-нибудь ферромагнетик, например, кусок железа, то в этом куске магнитные линии как бы сгущаются. Если же на пути силовой линии встретится диамагнетик, в нем, наоборот, создается разрежение, вакуум силовых линий. В сверхпроводник магнитные силовые линии вообще не проникают. Другими словами, сверхпроводник — абсолютный диамагнетик. Внутренняя область сверхпроводника идеально экранирована от внешних магнитных полей токами, протекающими в тонком поверхностном слое сверхпроводника. В этот слой проникает и магнитное поле, вследствие чего его глубину называют глубиной проникновения и обозначают буквой *K*. Диамагнетизмом сверхпроводников можно воспользоваться, например, для того, чтобы придать силовым линиям магнитного поля заданную конфигурацию. Поле будет обходить сверхпроводник, а силовые линии принимать очертания, повторяющие контур сверхпроводника.

Сверхпроводник существенно отличается от идеального проводника с сопротивлением, равным нулю. В идеальный проводник поле может проникать. Наоборот, никакими способами нельзя заставить магнитное поле проникнуть внутрь сверхпроводника!

Впрочем, один способ есть: при достижении магнитным полем в какой-либо точке сверхпроводника значения, превышающего некоторое критическое значение, сверхпроводник в этой точке выходит из сверхпроводящего состояния. Критические магнитные поля чистых металлов малы: они не превышают сотых долей тесла.

Ток, протекающий по сверхпроводнику, при превышении им критического значения или критической плотности также может вызывать потерю сверхпроводимости. Значение этого тока в чистых сверхпроводниках связано с критическим магнитным полем так называемым правилом Сильсби: сверхпроводимость уничтожается таким током в проводнике, который создает на поверхности сверхпроводника поле, равное критическому. Значение поля на поверхности проводника можно установить, пользуясь законом полного тока.

У каждого сверхпроводника есть также своя критическая температура, т.е. температура, выше которой он скачком теряет сверхпроводящие свойства. Эта температура весьма мала.

На критическую температуру влияют, хотя и слабо, механические напряжения в образце. Как правило (однако, не всегда), увеличение механических

напряжений в образце влечет за собой повышение критической температуры. Это можно установить лишь с помощью весьма чувствительных методов.

Аналогичная зависимость существует между механическим напряжением и критическим магнитным полем. Было показано, в частности, что критическое поле образца олова при 2 К, составляющее 0,021 Тл, повысилось до 1,5 Тл, после того как в олове были искусственно созданы механические напряжения.

Уменьшение размеров испытуемого образца примерно до 1 мкм существенно изменяет свойства сверхпроводника. Такой образец уже не будет диамагнитным, а его критическое поле и ток сильно возрастут.

Уменьшая толщину образца, можно увеличить его критическое поле в несколько сот раз. У сверхпроводящей свинцовой пленки толщиной 20 Å критическое поле равно 40 Тл. Плотность критического тока в тонких сверхпроводящих пленках также сильно возрастает.

В слоях толщиной около 100 Å плотность тока достигает  $10 \dots 10^4$  А/см<sup>2</sup>.

При увеличении частоты магнитного поля или тока сверхпроводник постепенно начинает приобретать сопротивление. Однако при частоте вплоть до  $10^7$  Гц оно еще практически равно нулю.

Как показал американский ученый Купер, электроны в сверхпроводящем состоянии образуют пары. Образование этих пар становится возможным, когда взаимодействие электронов проводимости, имеющих антипараллельные спины (грубо говоря, вращающиеся в разные стороны), с решеткой приводит к возникновению между ними сил притяжения, преодолевающих силы электрического отталкивания.

На основании предположения Купера были разработаны теория сверхпроводимости БКШ, названная по фамилиям авторов Дж. Бардина, Купера, Шриффера, и теория Н.Н.Боголюбова.

На разрыв куперовских пар требуется затратить некоторую энергию. В результате этого энергия сверхпроводящих электронов на некоторое значение меньше энергии нормальных электронов. Эту разницу называют энергетической щелью. Это так называемый фотонный механизм образования куперовских пар. Расчеты показывают, что такой механизм может обеспечить сверхпроводимость при температурах, ни в коем случае не превышающих 50 К. Конечно, даже эта температура не очень удобна для работы, но ее достичь пока не удалось. Рекорд перехода в сверхпроводящее состояние у сплава ниобия с германием (24 К) продержался почти 10 лет.

А не может ли существовать иных механизмов, приводящих к образованию электронных пар? В 1964г. американец В.Литтл предположил существование механизма, при котором электроны могли бы взаимодействовать, индуцируя электрический заряд на длинных органических молекулах, В то же время академик В.А.Гинзбург теоретически открыл еще один так называемый экситонный механизм образования куперовских пар. Эти теории предсказывали, что сверхпроводимость может существовать даже при комнатных температурах, т.е. при 300 К.

Физики-экспериментаторы не покидали лабораторий, лихорадочно исследуя "подозрительные" материалы — органические полимеры и слоистые структуры металл — проводник. Им сопутствовала удача — были открыты новые сверхпроводники, но... температура их перехода оказалась небольшой. Гораздо ниже уже достигнутых 24 К.

Полна драматизма история научных открытий! Увлечшись органическими полимерами и слоистыми структурами, ученые-экспериментаторы оказались недостаточно внимательными к другим веществам, в частности к керамике. В 1979г. исследователи Института общей и неорганической химии АН СССР имени Н.С.Курнакова И.С.Матыгин, Б.Г.Кохан и В.Б.Лазарев получили новую лантан-стронциевую и лантан-бариевую керамику. Керамика оказалась примечательной — она проводила ток, как обычный металл. Электросопротивление керамики, как и полагалось, снижалось с понижением температуры. Исследователи довели испытание до температуры жидкого азота (77 К) и остановились... Они никак не ожидали того, что эта керамика... если понизить ее температуру еще до 40 градусов... превратилась бы в удивительный высокотемпературный сверхпроводник, который так давно искали! Но не там...

И вот, в апреле 1986г. ученые Цюрихского филиала фирмы ИБМ в Швейцарии Дж. Беднорц и А.Мюллер, исследуя по существу ту же керамику, что и наши химики, но при, более низких температурах, обнаружили в ней сверхпроводимость при 30 К! Так был побит рекорд, продержавшийся почти 10 лет!

Однако и это важнейшее достижение не было замечено — в январском 1987г. номере журнала "Физике тудей", где зарегистрированы все крупнейшие достижения физики 1986г., об этом открытии не сказано ни слова!

Настоящий бум начался в начале 1987г. Из лабораторий США, КНР, СССР с лихорадочной скоростью стали поступать новые и новые сверхсенсационные сообщения. Температура сверхпроводящего перехода росла буквально на глазах! 35... 40... 92 К. Это уже выше температуры кипения жидкого азота. Рекордная температура достигнута одновременно учеными СССР и США. Заведующий лабораторией сверхпроводимости Физического института АН СССР имени П.Н.Лебедева А.И.Головашкин 11 марта 1987г. на общемосковском семинаре физиков, проводящимся в ФИАНе под руководством В.Л.Гинзбурга, сообщил, что ему и его сотрудникам на одном из образцов керамики удалось получить температуру сверхпроводящего перехода 102 К. Перейден рубеж, еще полгода назад казавшийся немыслимым! Впервые обнаружен нефотонный механизм образования куперовских пар, предсказанный четверть века назад. Ученые штурмуют "комнатные температуры" — около 0°С. Может быть, когда эта книга выйдет в свет, "комнатные" сверхпроводники станут реальностью!

Чистые сверхпроводники (за исключением ниобия) относят к сверхпроводникам 1-го рода (группы). Большинство сверхпроводников, а их уже открыто более тысячи, относят к сверхпроводникам 2-го рода. Термин "сверхпроводники 2-го рода" введен в 1952г. советским ученым А.А.Абрикосовым, развившим теорию сверхпроводимости Гинзбурга — Ландау. Термин оказался необ-

ходим для определения сверхпроводников с отрицательной поверхностной энергией, в отличие от сверхпроводников 1-го рода, у которых поверхностная энергия на границе сверхпроводящей и нормальной фаз положительна. Отрицательная поверхностная энергия может иметь место, если так называемый параметр Гинзбурга — Ландау больше  $1/\sqrt{2}$ .

В 1961г., встретившись со студентами, прославленный академик Л.Д.Ландау рассказал о себе. Родился он в Баку. В школе учился посредственно, зато любил математику, в 12 лет научился дифференцировать, в 13 — интегрировать.

В Бакинском университете он учился одновременно на двух факультетах физики и химии, но, когда в 1924г. перевелся в Ленинград, отдал предпочтение физике. Заниматься наукой и печататься в специальных журналах начал еще студентом, после аспирантуры Ленинградского физтеха полтора года стажировался в Германии, Швейцарии, Дании, Англии, где его поразили скромность, доступность, приветливость таких признанных светил европейской науки, как В.Паули, В.Гейзенберг, М.Дирак, Н.Бор, А.Эйнштейн. Потом работал в Ленинграде, Харькове, Москве.

Л.Д.Ландау был поистине человеком необычным. Талантливый, работоспособный, мыслящий оригинально, он славился невероятным стремлением оспаривать все устоявшееся. Так, он считал, или, по крайней мере, писал, что Татьяна Ларина "в целом была довольно занудной особой", что замысел "Героя нашего времени" мог бы разъяснить один лишь Лермонтов и т.п.

Будучи в 30-х годах в заграничной командировке, он поразил одного своего приятеля и соавтора взглядами на брак. Тот впоследствии вспоминал:

"Ландау нравилось делать заявления, шокирующие представителей буржуазного общества. Когда мы были вместе с ним в Копенгагене, я женился. Он одобрил мой выбор (и играл в теннис с моей женой). Однажды он спросил нас, как долго мы собираемся быть вместе. Когда я ответил, что, конечно же, весьма долгое время и что у нас нет никаких намерений расторгнуть брак, он разволновался и сказал, что только капиталистическое общество может заставить своих членов испортить саму по себе неплохую вещь, чрезмерно продляя ее таким способом".

В 1937г., поссорившись с директором Ленинградского физико-технического института (ЛФТИ) А.Ф.Иоффе и руководством Харьковского университета, где он работал после ЛФТИ, Л.Д.Ландау появляется в Москве. П.Л.Капица приглашает его в Институт физических проблем, и Ландау немедленно соглашается.

Он сразу же начинает активнейшую деятельность в новых малоразработанных и важных направлениях — в теории фазовых переходов, статистической теории атомных ядер, каскадной теории электронных ливней... Основное внимание его занимает загадка непонятого явления, открытого П.Л.Капицей, — свертхтекучести.

Ландау предположил, что жидкий гелий представляет собой некоторый конгломерат из двух жидкостей, находящихся в различных квантовых состояниях. Этим он и объяснял одновременные встречные движения жидкого гелия.

Вокруг талантливого физика довольно быстро сформировалось окружение, "школа Ландау". Попасть туда было нелегко, "теорминимум" включал десять дисциплин, за 28 лет всего 43 человека сдали эти экзамены целиком. Рекорд (два с половиной месяца) остался за Померанчуком, обычно у соискателей на подготовку и сдачу экзаменов уходило до трех лет.

На теоретических семинарах можно было говорить о любой проблеме теоретической физики. Со времени стажировки в Копенгагене у Н.Бора Ландау вместе с тогдашними коллегами В.Вайскопфом и Р.Пайерлсом взяли за правило не придерживаться узких специализаций, чтобы всегда видеть физику целиком. Атмосфера обсуждений была предельно демократичной, можно было резко критиковать взгляды другого при условии, что критика шла на пользу обсуждаемому предмету. Неслучайно, что эта творческая атмосфера способствовала созданию знаменитого "Курса теоретической физики", разросшегося впоследствии до десяти томов и выполняющего функции камертона советской науки.

Курс стал издаваться с 1938г.; авторами выступили тогда Ландау и его друг Евгений Михайлович Лифшиц. Без Лифшица курс никогда бы не увидел света. Гений Ландау имел одну особенность — он писал с колоссальным трудом даже письма. Лифшиц говорил об этом:

"Ему было нелегко написать даже статью с изложением собственной (без соавторов!) научной работы, и все такие статьи в течение многих лет писались для него другими. Непреодолимое стремление к лаконичности и четкости выражений заставляло его так долго подбирать каждую фразу, что в результате труд написания чего угодно — будь то научная статья или личное письмо — становился мучительным".

Все книги Ландау написаны в соавторстве с Е.М.Лифшицем, А.С.Ахиезером, А.И.Китайгородским, Ю.Б.Румером, А.Я.Смородинским; это же относится и к большинству его статей. Если отвлечься от соавторства с Р.Пайерлсом, Э.Теллером и другими крупными зарубежными физиками, основной массив совместных работ Ландау падает на сотрудничество с его многочисленными учениками (А.А.Абрикосов, Е.М.Лифшиц, И.А.Померанчук, И.М.Халатников и др.).

Жизнь и творчество Ландау неотделимы от жизни и творчества его учеников. Ландау выработал, как говорит академик Капица, "крайне своеобразный процесс исследования, основная особенность которого заложена в том обстоятельстве, что трудно отделить собственную работу Ландау от работы его студентов. Трудно представить, как он мог бы успешно работать в столь различных областях физики без своих студентов".

В школе Ландау были глубоко восприняты и развиты традиции научного общения, бережно пестовавшиеся в лучших европейских физических школах (в кавендишской у Дж. Томсона и Э.Резерфорда, в копенгагенской у Н.Бора).

Достаточно сказать, что научное общение Ландау было настолько интенсивным, что он мог бы не читать физических книг и журналов, черпая информацию у студентов и коллег на своих бурных семинарах.

Касаясь взаимоотношений со своими соавторами и учениками, Ландау как-то сказал со свойственной ему, образностью: "Некоторые говорят, что я граблю своих учеников. Некоторые — что ученики грабят меня. Правильнее было бы сказать, что у нас происходит взаимный грабеж".

Преданность и любовь физиков к Ландау особенно ярко проявились в 1962г., когда Ландау тяжело пострадал в автомобильной катастрофе. Шесть лет ученики, друзья, коллеги ежедневно боролись за жизнь ученого, но вернуть его в строй не удалось. В больнице посол Швеции вручил Ландау Нобелевскую премию.

Ландау, по его собственным словам, прожил свою жизнь счастливо, все ему удавалось, он сделал все, на что был способен.

Он трезво и скромно оценивал свои успехи в науке. Известна его логарифмическая шкала ценностей — научных заслуг отдельных ученых, состоящая из пяти классов, причем представители каждого последующего класса сделали, по мнению Ландау, в десять раз меньше предыдущего.

К первому классу он причислял Ньютона, Френкеля, Клаузиуса, Максвелла, Больцмана, Гиббса, Лоренца и Планка, Бора, Гейзенберга, Шредингера, Дирака и Ферми. Эйнштейн принадлежал к "половинному классу". Себя Ландау относил к "двухполовинному классу", но однажды, после какой-то особо удачной работы он перевел себя во второй класс.

Ландау первым пролил свет на природу сверхпроводимости. В 1950г. он и считающий себя его учеником В.Л.Гинзбург (ныне академик) опубликовали обобщенную феноменологическую теорию сверхпроводимости, являющуюся по существу следствием идеи об одновременном существовании двух электронных жидкостей.

Ландау первым сопоставил два "странных" явления, сверхпроводимость и сверхтекучесть — течение жидкого гелия II без трения через узкие капилляры, и предположил, что они родственны. Сверхпроводимость — это сверхтекучесть весьма своеобразной жидкости — электронной. Эта идея Ландау оказалась в высшей степени плодотворной, на ее основе построено большинство теорий сверхпроводимости.

Следующий шаг был сделан одновременно советским физиком академиком Н.Н.Боголюбовым и американскими физиками Д.Бардиным, Л.Купером и Дж. Шриффером. Теория, разработанная ими, сводится, грубо говоря, к предположению о том, что сверхпроводящие электроны в отличие от обычных объединены в пары, тесно связанные между собой. Разорвать пару и разобщить электроны чрезвычайно трудно. Такие мощные связи позволяют электронам двигаться в материале, помогая друг другу и не встречая электрического сопротивления.

Ярким достижением в разработке теории сверхпроводимости являются работы ученика Л.Д.Ландау члена-корреспондента АН СССР А.А.Абрикосова.



Он, детально рассмотрев один из "малоинтересных" частных случаев уравнения Гинзбурга — Ландау, теоретически подтвердил давнюю догадку Шубникова о преимуществах сверхпроводящих сплавов перед сверхпроводящими металлами. За разработку этой теории ее авторы удостоены Ленинской премии, а теория получила мировое признание.

Когда основные положения ее были доложены Абрикосовым на Международной конференции по низким температурам в Москве, в зале долго не смолкали аплодисменты.

Итак, теория разработана, она утверждает, что в металлургических лабораториях со дня на день должны появиться сплавы с предсказанными физиками чудесными свойствами...

И вот в 1961г. американский физик Дж. Кунцлер, исследуя сплав ниобия с оловом, обнаруживает совершенно фантастические сверхпроводящие свойства этого соединения. Оказалось, что даже самое сильное магнитное поле 8,8 Тл, имевшееся тогда в Соединенных Штатах, не в силах разрушить сверхпроводимость сплава. (В 1961г. в США крупнейший исследовательский электромагнит давал поле 8,8 Тл; именно в его поле и проводились испытания нового сверхпроводника. Поле магнита, как видно из статьи Кунцлера, оказалось недостаточным, чтобы "выключить" сверхпроводимость.) Вскоре в Институте физических проблем под руководством члена-корреспондента АН СССР Н.Е.Алексеевского было обнаружено несколько других сверхпроводящих соединений и сплавов, обладающих удивительными свойствами...

Путь к сверхпроводящим магнитам, сверхпроводящим техническим устройствам был открыт...

Уже через несколько лет были созданы магниты, о которых Камерлинг-Оннес мог только мечтать: сверхпроводящие, легкие, дешевые, небольшие по габаритам, с полем сначала 10, 12, а потом и 25 Тл. Они созданы в Институте атомной энергии имени И.В.Курчатова, в Институте теоретической и экспериментальной физики.

Сверхпроводники, имеющие параметры Гинзбурга — Ландау более  $1/\sqrt{2}$ , — это в основном различные сверхпроводящие сплавы. Из теории ГЛАГ (В.Л.Гинзбург — Л.Д.Ландау — А.А.Абрикосов — Л.П.Горьков) следует, что критические поля и температуры сверхпроводников 2-го рода должны быть очень высокими. Открытие Кунцлером сверхпроводимости у  $Nb_3Sn$  блестяще подтвердило этот вывод. Как выяснилось позже, критические поля многих сплавов (таких, например, как  $Nb_3Ge$ ,  $V_3Ga$  и др.) превышают 20...25 Тл. Эти сверхпроводники обладают по сравнению со сверхпроводниками 1-го рода более высокими критическими полями и температурами. Возможно, что в скором времени будут открыты сверхпроводники с еще лучшими сверхпроводящими свойствами. Так, пределом критической температуры считают 40 К (достигнуты температуры, превышающие 20 К). Это ограничение относится к известному типу сверхпроводимости, при котором образование электронной пары, способной двигаться через решетку без трения, обусловливается полем колебаний решетки. В этом поле один электрон испускает квант колебания, а

другой поглощает его, вследствие чего потерь энергии не происходит и электрическое сопротивление отсутствует.

Если же механизм сверхпроводимости иной, то возможно получение более высоких критических температур. Так, в печати обсуждалась возможность сверхпроводимости в линейных полимерах вплоть до критической температуры 1000 К.

Свойства сверхпроводников 1-го и 2-го рода значительно различаются: например, переход в сверхпроводящее состояние у сверхпроводников 2-го рода происходит очень плавно, в широком диапазоне значений магнитного поля.

Поскольку сверхпроводники 2-рода проницаемы для магнитных полей и обладают при наличии неоднородности состава гистерезисом, питание их переменным током или помещение их в переменное магнитное поле вызывает потери энергии. Показано, что эти потери при частоте 50 Гц для ниобий-циркониевого (25% циркония) сплава составляют 0,3 кВт, если по сверхпроводнику длиной 1 м проходит ток 10 кА. Эти потери можно значительно снизить, если уменьшить размеры сверхпроводника, например, разделив его на тонкие нити или впрессовав в пористый материал.

Такие "синтетические" сверхпроводники обладают по крайней мере двумя преимуществами: во-первых, при уменьшении размеров сверхпроводника улучшаются его сверхпроводящие свойства; во-вторых, снижаются потери на вихревые токи в несверхпроводящих областях синтетического сверхпроводника...

Если вспомнить Камерлинг-Оннеса, то, будучи скорее инженером, чем чистым физиком, он уже в 1913г. решил построить сверхпроводящий электромагнит на 10 Тл, не потребляющий энергии. Поскольку, рассуждал Камерлинг-Оннес, сопротивление сверхпроводника равно нулю, ток в сверхпроводящем кольце будет циркулировать вечно, не затухая. Всякий ток, как известно, создает магнитное поле. Так почему бы не сделать из сверхпроводящей проволоки мощный электромагнит, не нуждающийся в питании энергией? Это было бы революцией в электротехнике, и человечество сэкономило бы миллионы киловатт электроэнергии, растрачиваемой понапрасну не только в обмотках магнитов, но и в обмотках электрических машин и трансформаторов. Наконец, можно было бы передавать электроэнергию по сверхпроводящим линиям передачи без потерь.

К сожалению, мечте Камерлинг-Оннеса о сверхпроводящем соленоиде на 10 Тл не суждено было сбыться по крайней мере при его жизни. Как только Камерлинг-Оннес пробовал пропускать по сверхпроводнику значительный ток, сверхпроводимость исчезала. Вскоре оказалось, что и слабое магнитное поле (индукция самое большее в несколько сотых долей тесла) также уничтожает сверхпроводимость. Поскольку такие слабые поля можно было гораздо проще получить с помощью постоянных магнитов, реализацией идеи создания сверхпроводящих магнитов никто тогда серьезно не занялся. Это довольно

грустное открытие сделало с того времени разговоры о сверхпроводящих магнитах беспредметными.

Надежды на постройку мощных сверхпроводящих магнитов возродились почти через двадцать лет, в начале 30-х годов, когда голландские физики Де Гааз и Вуугд, преемники Камерлинг-Оннеса по Лейденской лаборатории (Камерлинг-Оннес умер в 1926г., так и не дожив до начала практического использования своего открытия), установили, что сплав свинца с висмутом остается сверхпроводящим в магнитных полях, превышающих 1,5 Тл. Это открытие давало возможность строить сверхпроводящие магниты по крайней мере с таким полем. Однако эти магниты так никто и не построил. Известный физик Кеезом, бывший в то время директором Лейденской лаборатории, объявил, что максимальные токи, которые при наличии магнитного поля выключают сверхпроводимость в сплаве свинца с висмутом, ничтожно малы. Приговор был вынесен.

В истории сверхпроводящих магнитов произошло, быть может, самое драматическое событие. Впоследствии оказалось, что Кеезом сделал то, чего не имел права делать: он экстраполировал данные, полученные им в слабых полях, на область сильных полей. К несчастью, Кеезом был слишком авторитетен. Едва узнав о его результатах, физики оставили надежду построить сверхпроводящий магнит и занялись другими проблемами. Между тем в настоящее время известно, что критический ток для сплава свинец-висмут в полях до 2 Тл достаточно высок для того, чтобы создать довольно мощные сверхпроводящие магниты. Авторитет Кеезома стоил физике очень дорого: постройка сверхпроводящих магнитов была отложена почти на 30 лет.

Лишь после того, как в 1961г. Кунцлер и его сотрудники объявили, что кусочек проволоки из сплава ниобия с оловом ( $Nb_3Sn$ ) оставался сверхпроводящим в поле 8,8 Тл, даже в том случае, когда одновременно по этой проволоке пропускали ток плотностью 1000 А/мм<sup>2</sup>, началась новая эра в истории сверхпроводимости.

Свойства вновь открытых сверхпроводников делали реальными планы их использования в технике. Сверхпроводимость начала как бы вторую жизнь, но теперь уже не в качестве любопытного лабораторного феномена, а как явление, открывающее перед инженерной практикой весьма серьезные перспективы. Но и здесь оказались свои трудности.

Если все сложилось так удачно, то спрашивается, почему традиционные мамонтоподобные магниты еще не вышли из употребления? Почему до сих пор сверхпроводящие магниты не завоевали принадлежащего им по праву места?

Пожалуй, в первую очередь это объясняется тем, что сверхпроводники с хорошими свойствами оказались очень капризными. Обращение с ними требовало от ученых поиска новых технологических решений, новых представлений о природе сверхпроводимости. Сейчас уже созданы сверхпроводящие электротехнические материалы, которые можно успешно использовать в электромагнитах. Среди них есть, например, такие сплавы, как ниобий-цирко-

ний-титан и ниобий-титан. Они хорошо поддаются обработке и из них сравнительно легко получить проволоку. Злые языки, правда, подшучивают, что эта проволока дороговата, так как ее пока что изготавливают сами ученые. Но производство сверхпроводящей проволоки уже налажено на заводах, и стоимость ее неуклонно снижается.

Однако наиболее перспективные сверхпроводящие материалы (сплавы ниобий-олово и ванадий-галлий) чрезвычайно хрупки (например, сплав ванадий-галлий легко растирается в порошок пальцами). Поэтому такие соединения приходится упаковывать в гибкие трубки или наносить на гибкую подложку. Даже такая сложная технология изготовления себя оправдывает. Вот лишь один факт. В сверхпроводящих соленоидах, навитых из стальной ленты с нанесенным на нее слоем из сплава ниобий-олово, достигнуты магнитные поля до 17 Тл. И это при массе магнита в несколько десятков килограммов вместо нескольких десятков тонн и практически при нулевом потреблении электроэнергии вместо нескольких тысяч киловатт, которые потребовались бы для работы несверхпроводящего магнита с теми же параметрами!

Сверхпроводящие соленоиды могут работать почти не потребляя энергии, поскольку однажды возбужденный в них ток практически не затухает.

Количество энергии, расходуемой в оживителе гелия и необходимой для поддержания магнитов при низкой температуре, не идет ни в какое сравнение с теми громадными количествами ее, которые тратятся в несверхпроводящих магнитах.

Конечно, постройка сверхпроводящих магнитов — далеко не простое дело. Одна из серьезных и неожиданных трудностей, с которой пришлось столкнуться конструкторам сверхпроводящих магнитов, — так называемая проблема деградации сверхпроводящей проволоки в соленоидах. Чтобы понять сущность деградации, вспомним, как, например, определяют нагрузку, которую может выдержать балка. Для этого, конечно, не обязательно ее подвергать испытаниям. Надо лишь знать материал, из которого сделана балка, и характер ее нагружения в работе. А так как прочность материала известна (она измерена в результате испытаний небольших образцов), то все сводится к несложным расчетам. Грубо говоря, во сколько раз сечение балки больше сечения образца, во столько раз большую нагрузку эта балка сможет выдержать. Словом, какой бы длинной или толстой ни была балка, ее свойства можно более или менее достоверно заранее рассчитать, зная свойства маленького образца из того же материала.

А вот для сверхпроводящих сплавов этих простых зависимостей не существует. Если сечение одной проволоки в 10 раз больше сечения другой, сделанной из такого же материала, то это вовсе не значит, что по первой можно пропускать ток в 10 раз больший. Кроме того, характеристики сверхпроводника, измеренные на кусочке проволоки, не совпадают с характеристиками навитых на катушки длинных кусков проволоки. Катушки, рассчитанные на одно поле, дают в действительности другое, значительно более низкое.

Это явление объясняют тем, что магнитное поле проникает в сверхпроводник в виде так называемых квантов потока. Так как проникновение потока носит скачкообразный характер и всякое изменение поля во времени вызывает появление ЭДС, в некоторых участках проволоки образуются вихревые токи, разогревающие проволоку и преждевременно переводящие ее в нормальное, несверхпроводящее состояние. Поэтому приходится увеличивать объем и массу катушки по сравнению с теми, которые она имела бы, если бы характеристики короткого и длинного кусков проволоки совпадали. Это очень невыгодно по экономическим соображениям: сверхпроводящая проволока пока еще дорога (несколько сотен рублей за 1 кг).

В настоящее время проблему деградации интенсивно исследуют. Иногда с ней удастся справиться. Уменьшению деградации способствует, например, покрытие сверхпроводящей проволоки медью. Выяснилось, что при увеличении толщины слоя меди свойства сверхпроводящих соленоидов значительно улучшаются. Поэтому некоторые исследователи пришли к выводу, что наилучшим материалом для сверхпроводящих магнитов является... медь, в которую впрессован сверхпроводник! В таких системах эффект деградации полностью отсутствует.

Как ни странно, другая проблема, считавшаяся одной из наиболее трудно-преодолимых, оказалась на поверку сравнительно простой. Речь идет о том, что сверхпроводимость известных до сих пор соединений существует лишь при температурах, очень близких к абсолютному нулю. Так, ни один из известных сверхпроводников не может оставаться в сверхпроводящем состоянии при температуре выше 24 К. Не очень радуют и прогнозы физиков-теоретиков. Они установили, что принципиально невозможно получить материал, остающийся сверхпроводящим при температурах выше 40 К, т.е. выше  $-233^{\circ}\text{C}$ . Тем не менее поиск сверхпроводников, не теряющих сверхпроводимости при 30...40 К, ведется весьма активно.

Для получения низких температур пользуются гелием, превращающимся в жидкость при 4,2 К. Даже самые незначительные количества тепла, проникшего в сосуд, где содержится жидкий гелий, способны вызвать его быстрое испарение, поэтому жидкий гелий надо хранить в специальных сосудах, имеющих исключительно хорошую теплоизоляцию.

Решать эту проблему конструкторам сверхпроводящих магнитов фактически не пришлось. Они воспользовались плодами разработок, проведенных теми, кто занимался вопросами освоения космоса. Успехи ученых и инженеров СССР и США, работающих над задачей хранения ракетного топлива в сосудах-криостатах, привели к созданию надежной конструкции и эффективного способа изоляции таких сосудов. В них можно хранить жидкий гелий в течение нескольких месяцев.

Наиболее прогрессивным до сего времени методом охлаждения газообразного гелия является метод получения его в жидком виде с помощью созданного академиком П.Л.Капицей в 1934г. поршневого детандера. Сущность этого метода заключается в том, что газообразный гелий расширяется в специальном

сосуде — детандере, толкая при этом поршень, т.е. совершает некоторую работу, отдавая энергию. При этом гелий охлаждается. Многократно повторяя цикл, можно в принципе добиться того, что гелий охладится до 4,2 К и превратится в жидкость. Чаще всего, однако, охлаждение гелия в поршневом детандере сочетается с другими способами охлаждения, например дросселированием.

При дросселировании предварительно сжатый и охлажденный гелий пропускается через узкую щель — дроссель, где он расширяется. Физическая сущность охлаждения при дросселировании (эффект Джоуля — Томсона) состоит в том, что при увеличении объема газа, происходящем при расширении в дросселе, межмолекулярные расстояния в газе растут, при этом совершается некоторая работа против сил притяжения. Газ теряет свою внутреннюю энергию и, следовательно, охлаждается.

Один из "классических" детандерных ожижителей гелия создан в Институте физических проблем АН СССР. Опишем принцип его работы.

Поршневой компрессор сжимает гелий, поступающий из газгольдеров, и подает его в ожижитель. Туда поступает около  $350 \text{ м}^3/\text{ч}$  газообразного гелия, сжатого до 22...23 атм. Сначала гелий охлаждают в ванне с жидким азотом (70 К). Затем часть охлажденного гелия поступает в поршневой детандер, где гелий расширяется, заставляя двигаться поршень, причем температура гелия в это время падает до 11... 12 К. Холодный гелий используется теперь для охлаждения новых порций гелия. Другая часть газообразного охлажденного гелия поступает в так называемую дроссельную ступень, где газ заставляют пройти через дроссель. При этом уже основательно охлажденный газ еще больше охлаждается, частично превращаясь в жидкость (сжижается примерно около 10% первоначально имевшегося количества гелия).

Производительность аппарата 45 л/ч, расход электроэнергии 2,5 кВтч/л жидкого гелия. Такая производительность, однако, не предел. За последние годы в СССР и США созданы гелиевые ожижительные установки производительностью 200 л/ч и более. Мала или велика эта производительность?

Теплота испарения жидкого гелия настолько низка, что электролампочка мощностью 4 Вт, работающая в жидком гелии, испарила бы более 50 л жидкого гелия за 1 ч!

Тем не менее полное отсутствие сопротивления у сверхпроводящих обмоток и, следовательно, отсутствие выделения тепла позволяют обходиться такими количествами жидкого гелия даже для самых крупных обмоток. Важно лишь обеспечить очень хорошую теплоизоляцию области, где находится сверхпроводящая обмотка, с тем чтобы тепло не поступало в эту область извне.

Самая лучшая теплоизоляция — это высокий вакуум (остаточное давление  $10^{-5} \dots 10^{-6}$  мм рт.ст.). Теплопроводность остаточного газа в этом случае ничтожно мала для того, чтобы обеспечить хоть сколько-нибудь заметную теплопередачу. При вакуумной изоляции решающее значение приобретает теплопередача лучеиспусканием. Чтобы ликвидировать или по крайней мере существенно снизить передачу тепла от области с высокой температурой к

низкотемпературной, на пути излучения в вакууме необходимо поставить отражающие экраны, охлаждаемые каким-либо хладагентом. Охлаждение экрана необходимо потому, что теплопередача излучением пропорциональна разности четвертых степеней температур поверхностей. Снижая эту разность, можно добиться еще большего эффекта теплоизоляции. Достаточно сказать, что установка экрана, охлаждаемого жидким азотом, снижает приток тепла в низкотемпературную область в 200 раз!

Хранят жидкий гелий в специальных сосудах Дьюара. Обычно они имеют сферическую форму, поскольку сфера при данном объеме имеет самую маленькую поверхность, а каждый лишний сантиметр поверхности — это и лишний приток тепла внутрь сосуда! Наиболее часто употребляемый сосуд (модель СД-10Г) может вместить около 10 л жидкого гелия. Гелий содержится в сферическом резервуаре, который расположен внутри ванны с азотом, помещенной, в свою очередь, внутри сферического корпуса, имеющего комнатную температуру. В пространстве между внешним корпусом и сосудами с азотом и гелием создается глубокий вакуум. В таком сосуде в сутки теряется не более 2% гелия.

Существуют стандартные сосуды большей емкости, например, на 50, 80, 100 л. Развитие сверхпроводниковой техники приведет к созданию значительно больших емкостей. Уже сейчас для централизованного снабжения гелием используют гелиевые цистерны вместимостью 10...30 тыс. л. В этих гигантских устройствах применяются уже несколько иные принципы теплоизоляции. Здесь использована так называемая многослойная вакуумэкранная изоляция. Она представляет собой вакуумный промежуток, заполненный большим числом слоев алюминиевой фольги, проложенных теплоизоляционными материалами, например стеклотканью или стеклобумагой. Количество этих экранов может быть очень большим (более ста).

Можно считать в принципе решенной и проблему перекачки жидкого гелия по трубам, особенно остро стоящую перед теми, кто занимается созданием сверхпроводниковых линий электропередачи. Принцип, на котором создаются эти трубы, практически тот же, что и используемый при создании сосудов Дьюара. Это внутренняя труба с жидким гелием, окруженная concentрическим экраном, находящимся при температуре жидкого азота и помещенным, в свою очередь, во внешний кожух, имеющий обычную температуру. На внутренней поверхности гелиевой трубы нанесена пленка сверхпроводника, она и является токопроводом такой линии электропередачи.

Первые эксперименты в области создания крупных криогенных систем приносят обнадеживающие результаты. Можно быть уверенным в том, что уже в скором времени мы станем свидетелями новых поразительных успехов в этой области.

Успешно решена и задача создания сверхпроводящего магнита, магнитное поле которого существует при комнатной температуре. Одним из замечательных достижений на этом пути можно считать разработку и постройку сотрудниками Научно-исследовательского института электрофизической аппарату-

ры имени Д.В.Ефремова, Института атомной энергии имени И.В.Курчатова и Физического института АН СССР имени П.Н.Лебедева "гибридного" магнита, в котором сверхпроводящий соленоид с полем при комнатной температуре добавляет свое поле к полю биттеровского медного водоохлаждаемого соленоида на 15 Тл — суммарное поле составляет 25 Тл.

На Международном симпозиуме по сильным магнитным полям в Осаке, проводившемся в 1982г., группа американских исследователей (Л.Рубин с сотрудниками) сообщила, что им удалось построить гибридный электромагнит на 30 Тл.

Победа над деградацией и решение технической задачи охлаждения сверхпроводников до сверхнизких температур позволили ученым создать уникальные сверхпроводящие магнитные системы для исследования плазмы, магнитогидродинамических (МГД) установок, пузырьковых камер. В качестве примера упомянем построенный в США сверхпроводящий магнит, который может создавать магнитное поле 4 Тл в цилиндрическом объеме диаметром 20 см и длиной около 1,5 м. В сверхпроводящем магните для пузырьковой камеры достигнуто поле 7 Тл в объеме диаметром 18 см. Созданы сверхпроводящие магнитные системы с магнитным полем около 3 Тл и рабочим объемом диаметром до 5 м.

При покорении холодного мира сверхпроводников ученым пришлось заново решать множество проблем, считавшихся решенными. Например, какой источник тока годится, чтобы питать сверхпроводящее устройство? Если речь идет о сравнительно небольших токах, то в принципе годятся привычные батареи, генераторы или аккумуляторы. Однако ток, который можно пропустить по сверхпроводнику сечением 1 мм, составляет 1000 А, что более чем в 100 раз больше тока, пропускаемого через медный проводник такого же сечения. Это колоссальное преимущество сверхпроводников обернулось для инженеров новой трудностью. Ведь этот ток нужно получить от генератора, работающего при комнатной температуре, а уж потом по проводам передать в криостат с жидким гелием, где помещается сверхпроводящий магнит. Сечение проводов, по которым передается ток (а они несверхпроводящие), должно быть по крайней мере в 100 раз больше сечения сверхпроводника. По такому большому сечению, как через широко раскрытые ворота, тепло из комнаты (в полном соответствии с законом Фурье) лавиной устремится в криостат, гелий мгновенно выкипит, а сверхпроводимость исчезнет.

Вот почему перед конструкторами встала задача создать такие устройства, которые генерировали бы большие токи не вне криостата, а внутри него. Это удалось сделать, используя особые свойства сверхпроводников, например их диамагнетизм. Именно диамагнетизмом объясняется показываемый иногда в физических лабораториях опыт с "парящим магнитом". Описания парящего магнита не сходят со страниц книг, посвященных физике низких температур. Впрочем, не только этих...

"...Я немного прошелся между скалами, небо было совершенно ясно, и солнце жгло так сильно, что я принужден был отвернуться от него. Вдруг стало



темно, но совсем не так, как от облака, когда оно закрывает Солнце. Я оглянулся назад и увидел в воздухе большое непрозрачное тело, заслонявшее солнце и двигавшееся по направлению к острову... По мере приближения ко мне этого тела оно стало мне казаться твердым; основание же его было плоско, гладко и сверкало ярко, отражая освещенную солнцем поверхность моря..."

То, что увидел Лемюэль Гулливер, "сначала хирург, а потом капитан нескольких кораблей", было летающим островом. В его толще на алмазных опорах был установлен магнит, который, отталкиваясь от некоей субстанции находящейся в толще Земли, создавал подъемную силу!

Вряд ли Свифт предполагал, что через двести лет московский физик В.К.Аркадьев воплотит эту "безумную" идею почти в том же виде, хотя и в несколько ином масштабе. В его опыте небольшой магнит висел без какой-либо поддержки над свинцовой пластинкой. Эксперимент этот, называемый тогда "гроб Магомета" (по преданию, гроб с телом пророка Магомета висел в пространстве без всяких опор), был проведен при температуре, весьма близкой к абсолютному нулю, когда свинец становится сверхпроводником. Модификацию опыта Аркадьева реализовал по предложению В.И.Ожогина в Институте атомной энергии имени И.В.Курчатова молодой ученый А.В.Инюшкин. "Теплый" магнит висит над сверхпроводящим кругом из свинца, спрятанным в сосуд Дьюара из нержавеющей стали. Для нас в этих опытах особенно важно то, что он демонстрирует идеальный диамагнетизм некоторых сверхпроводников. В диамагнитное тело не могут проникнуть силовые линии магнитного поля: диамагнетик является для силовых линий магнитного поля непреодолимой преградой, стеной, непроницаемой плоскостью.

Диамагнетизм сверхпроводников — это поверхностный эффект, распространяющийся на глубину порядка 0,001 мм. Поверхность сверхпроводника превращается в своеобразное "магнитное зеркало", отражающее силовые линии внешнего магнитного поля. Можно считать, что и оригинал — падающий магнит, и отражение его в "магнитном зеркале" обладают абсолютно идентичными магнитными полями. Под тем местом, где у оригинала находится северный полюс, возникает отражение северного полюса. Эти полюсы отталкиваются до тех пор, пока не устанавливается равновесие; сила отталкивания магнита и его "двойника" становится равной массе магнита.

Принцип магнитного зеркала может найти многочисленные применения. Например, в электронных микроскопах, где пучок электронов фокусируется магнитным полем, фольга из сверхпроводника позволит до такой степени повысить разрешающую способность микроскопа, что станут различимыми отдельные атомы.

Магнитные свойства сверхпроводящего и нормального состояний проводника настолько различаются, что можно говорить о двух разных материалах. Из этого, в частности, следует, например, что сверхпроводящее кольцо вовсе не должно иметь дырку — отверстие в обычном механическом смысле. Сверхпроводящая пластинка, не имеющая отверстий, может считаться в магнитном

отношении кольцом, если хотя бы в одной ее точке, не соприкасающейся с краем, сверхпроводимость нарушена.

Несверхпроводящую, или "нормальную", зону в сверхпроводнике можно создать различными способами: нагревать его в какой-либо точке до температуры, превышающей критическую, сделать сильным местное магнитное поле; освещать узким пучком света небольшую область сверхпроводника (в последнем случае сверхпроводимость также теряется вследствие выделения тепла).

Если воспользоваться тем, что расположение нормальной области ("отверстия") на поверхности сверхпроводника легко менять, можно создать накопитель магнитного потока, или, как его иногда называют, топологический генератор. Особенно примечательным в этой конструкции является то, что постоянный ток снимается с неподвижной части устройства. По сути дела, это устройство есть бесколлекторный генератор постоянного тока, принципиальная неосуществимость которого была многократно доказана. В настоящее время в советских, американских и голландских лабораториях работают многие сотни таких "неосуществимых" устройств.

К числу устройств, считавшихся невозможными, относится и трансформатор постоянного тока. Получить постоянный ток во вторичной обмотке несверхпроводящего трансформатора действительно невозможно. Если подать на его первичную обмотку постоянный ток, то во вторичной обмотке появится слабый импульс тока, но он быстро затухает вследствие электрического сопротивления вторичной обмотки.

Если же вторичная цепь трансформатора будет сверхпроводящей, то при подаче тока в первичную обмотку во вторичной наведется ЭДС, вызывающая ток, который не может затухнуть даже тогда, когда уже нет вызвавшей его ЭДС. С помощью таких трансформаторов постоянного тока удавалось, подавая в криостат с жидким гелием небольшой ток по тонким проводникам, трансформировать его, доводя до 25 тыс. А.

Таким образом, особые свойства сверхпроводников были поставлены на борьбу с трудностями, проистекающими из тех же особых свойств. Благодаря такому подходу уже разработаны генераторы и трансформаторы, с помощью которых сверхпроводящий электромагнит может снабжаться током в несколько тысяч ампер! И этот ток циркулирует по сверхпроводящей обмотке в то время, когда из области с комнатной температурой к генератору или к трансформатору подается ток силой всего в несколько ампер.

Эти устройства помогают также сократить потребление сверхпроводящими магнитами жидкого гелия, т.е. сделать их еще более экономичными.

Какие прогнозы можно уже сейчас делать относительно будущего сверхпроводящих магнитов? Теперь ясно, что недалеко то время, когда будут построены сверхпроводящие магниты, создающие поле около 25 Тл в рабочем объеме, измеряемом несколькими кубическими метрами.

Про магнитные органы, про "магнитные Биллы" и "магнитные Форды"; как магнитами просеивать зерно, сортировать руду, чистить пляжный песок и ловить преступников; о магнитных поездах без колес, магнитных игрушках и

магнитных щупальцах; наконец, о фокусниках, мистификаторах и проходимцах, которые умеют обманывать людей, пользуясь тем, что магнитное поле весильно, но невидимо.

После открытий Романьози, Эрстеда, Ампера, Стерджена, Генри и Джоуля человечество получило в свои руки магниты неслыханной доселе силы. Куда направить эту мощь? Легкость получения больших усилий с помощью электромагнитов побуждала использовать эти новинки буквально во всех устройствах, где требовалось приложить хоть мало-мальски серьезное усилие. Ученые на несколько лет уподобились мальчику, который, впервые получив магнит в руки, пытается притянуть им все, что попадает на глаза: гвозди, бритвы, кровать, соседскую кошку. Электромагниты в большом числе появились в физических лабораториях, аристократических салонах, кабинетах врачей.

В одном из старинных журналов есть описание магнитного органа, установленного в соборе американского города Гарден-сити. В этом органе клапаны открывались при помощи специальных магнитов. Когда органист нажимал клавишу, в цепь магнита подавался ток, магнит притягивал стерженек, прикрепленный к клапану той трубки, которая должна была звучать. Этот процесс происходил так быстро, что трубку можно было бы заставить звучать шестьсот раз в минуту. На таком магнитном органе можно было исполнять весьма виртуозные вещи.

Уже в 1869г. магниты широко использовали в приводе жаккардовых станков и для пробивания отверстий в металлических плитах. Но прежде всего, конечно, электромагниты стали использовать по прямому назначению — для подъема тяжелых железных предметов. Сначала подъемные магниты исследовались в научных лабораториях. Еще в 1864г. в Свободной академии Нью-Йорка был создан электромагнит, весящий 260 кг, "который поднял семерых человек однажды и сколько он еще может поднять — никто не знает". Этот магнит, сделанный Чарльзом и Чесдером, представлял собой два стержня круглого сечения из мягкого железа диаметром 10 см и длиной по 1 м, соединенных в виде буквы V. На стержни было намотано 80 кг медной проволоки, изолированной хлопчатобумажной тканью. Для передвижения магнита по помещению использовалась вагонетка.

Вскоре после того, как было построено еще несколько таких крупных магнитов и все могли убедиться в их силе, надежности, компактности и удобстве, было предложено использовать электромагниты для подъема железных и стальных деталей на металлургических и металлообрабатывающих заводах. Вот как описывается рождение магнитного крана на сталелитейных заводах в Кливленде в питтсбургской газете "Пресс" за 1888г.

"Для проверки магнита в производственных условиях он был подвешен на тросе к цеховому крану. Подвеска осуществлялась с помощью веревки, поскольку железная цепь намагничивалась и мешала работе. Для возбуждения магнита было достаточно тока 5,5...6 ампер. При этом легко поднимался груз 320 килограммов, который мог быть легко сброшен при выключении тока... В цехе, где был пущен магнит, рассчитывали получить работу по переноске

железа 14 или 15 человек. С пуском магнита они оказались по отношению к нему в позиции Отелло, поскольку один мальчик с помощью кнопки стал теперь выполнять всю работу всей этой банды".

Сквозь грубоватый юмор питтсбургского журналиста просвечивает не слишком привлекательная картина технического прогресса при капитализме. Впрочем, с помощью магнитов некоторым из ставших в цехе ненужными рабочими была найдена работа по магнитной очистке территории завода и улиц. Этим рабочим называли "магнитными Биллами". В их обязанности входило носить на спине батарею, питающую электричеством магнит, который "Билл" держал в руках. С помощью этого магнита он собирал с земли железные опилки, гвозди и мелкие железные детали.

С развитием автомобильного транспорта "магнитный Билл" был заменен "магнитным Фордом", который ездил по плохим дорогам того времени и собирал с дороги все, что могло вызвать прокол камеры. Особенно большое применение "магнитные Форды" нашли во время первой мировой войны, когда резина была весьма дефицитной. "Магнитный Форд" экономически себя оправдывал. Так, доктор Браун из форта Байярд в Нью-Мексико, применив в 1928г. на автомобиле магнит диаметром 30 см, сократил количество проколов у своей машины на 75% и собрал за короткое время 2 т гвоздей.

В журнале "Сайнтифик Америкэн" дается описание "магнитного Форда": на любую старую автомашину на высоте 5... 10 см над землей подвешивается один или несколько небольших магнитов, которые "прощупывают" пространство перед колесами машины и между ними. С помощью одной такой машины за год было собрано около 12,5 т железа, "причем в Северной Дакоте сбор составлял 6,5 фунтов на милю, в то время как в Южной Дакоте — лишь 1,75 фунта на милю".

В России магниту было найдено весьма своеобразное применение — вплоть до революции "Общество конно-железных дорог и omnibusов" использовало магниты для очистки овса, шедшего на корм лошадям, от железных гвоздей. Во всей Европе и Америке магниты широко применялись на мельницах для очистки зерна.

Одним из крупнейших подъемных электромагнитов стал магнит, построенный в 1903г. в США. С его помощью можно было поднять груз в 20 т, т.е. железнодорожный вагон. Несколько позже был построен еще более мощный электромагнит, способный поднять 75 т, другими словами, целый паровоз.

Один из крупнейших электромагнитов, грузом которого была железная "баба" массой 20 т ("скулодробитель" — английский эквивалент "бабы"), был предназначен для разрушения бракованного литья. Электромагнит в этом случае имел серьезные преимущества, поскольку освобождение "бабы" при необходимости ее сброса вниз производилось просто поворотом выключателя.

Широко известен рекламный снимок, сделанный одной из немецких фирм, производящих магниты. Рабочий удерживается, уцепившись за стоящую вертикально цепь, прикрепленную к полу. Шар, укрепленный на другом конце железной цепи, притягивается к магниту так сильно, что цепь остается

натянутой, несмотря на то, что на ней повис человек. Железный шар не прикасается к магниту, и это говорит о колоссальной притягивающей силе этого магнита, так как с увеличением расстояния от притягиваемого предмета до магнита сила притяжения резко падает. Прокладывая между подковообразным магнитом и притянутым им телом лист бумаги, мы тем самым снижаем силу притяжения в 2 раза.

Широкое использование подъемных магнитов началось после того, как японцы чрезвычайно успешно применили их в массовом масштабе на судостроительной верфи в Иокогаме в 20-х годах нашего столетия.

Магнитная очистка зерна на мельницах стала прообразом чрезвычайно важного в настоящее время применения магнитов. Речь идет о так называемых магнитных сепараторах. Принцип их действия состоит в том, что смесь руды и пустой породы подается по конвейеру мимо полюсов магнита. Если пустая порода магнитна, она будет извлечена из смеси. Принцип магнитного сепаратора предложен еще в 1792г., т.е. до изобретения электромагнита. Затем на аналогичный сепаратор с электромагнитами был выдан патент в 1847г. Артуру Воллу. За Воллом последовал в 1854г. Шено, получивший патент на сепаратор с вращающимися магнитами.

В настоящее время магнитный метод разделения применяют во многих отраслях горнодобывающей промышленности, в частности в угледобывающей, где он начинает конкурировать с так называемым мокрым методом обогащения.

Почти повсеместно уголь обогащают в специальных отсадочных или флотационных установках. И отсадочный, и флотационный методы являются мокрыми, так как процесс обогащения происходит в воде, в результате чего и порода, и угольный концентрат нуждаются в сушке. Кроме того, мокрые методы требуют большого расхода (нескольких тысяч кубометров) воды, очистки загрязненной воды и предотвращения смерзания частиц в районах с суровым климатом.

Почти все неиспользуемые в угле примеси магнитны. Это дает возможность избежать мокрых процессов, установив по ходу движения ленты с размельченной породой магнитный ребристый ролик, который захватывает примеси и выносит их из породы. Такой метод очистки, позволивший снизить зольность угольной мелочи с 12... 17 до 7...8%, был впервые предложен и испытан в Советском Союзе.

А как очистить породу, например, от пирита, который немагнитен? Здесь ученые тоже нашли выход — пирит пропаривается в паровоздушной среде при 270...300°C и покрывается слоем магнитных окислов.

Другой тип сепаратора был изобретен в 80-х годах прошлого века Эдисоном. Говорят, что это произошло во время одной из ежедневных утренних прогулок Эдисона. Гуляя по берегу Лонг-Айленда, Эдисон заметил, что песок пляжа содержит частички окиси железа. Если сыпать такой песок между полюсами магнитов, можно легко отделить немагнитные частицы от окиси

железа. Эта идея Эдисона решила одну из проблем того времени: что делать с залежами руды, в которой содержание железа невелико?

Эдисон предложил преобразовать руду таким образом, чтобы она стала похожей на легко разделяемый песок пляжа, попросту говоря, размолоть ее. После размола в дробилках руда поступает в башню и сыпается с ее вершины. При падении частицы встречают все усиливающиеся магнитные поля нескольких мощных электромагнитов. Магнитная окись железа оседает на магнитах и снимается с их наконечников, а пустая порода беспрепятственно падает вниз.

Благодаря этому изобретению Эдисона залежи железной руды в штате Нью-Джерси, ранее считавшиеся промышленно бросовыми, стали рентабельными, для их разработки был построен целый город, названный по имени изобретателя — Эдисон-Сити.

Магнитные сепараторы применяют и в сельском хозяйстве для отделения семян клевера, льна, люцерны от семян сорняков. Инженеры воспользовались здесь оружием "врага" и обратили его против него самого. Дело в том, что семена сорняков (горчак, плевела), как правило, более шероховаты, их поверхность покрыта миниатюрными зацепками, позволяющими семенам прикрепляться к шерсти животных, одежде людей и т.п., что помогает сорнякам в их быстром распространении. Если засыпать загрязненные сорняками семена мелкими железными опилками, то опилки скопятся на семенах сорняков, в то время как гладкие семена злаков останутся чистыми. Теперь достаточно легко очистить зерно от сорняков в устройстве типа магнитного сепаратора.

Очень сходный по существу метод используется сейчас и при поимке преступника. Часто потожировые отпечатки пальцев, оставленные нарушителями на месте преступления, очень слабы и вдобавок ко всему оставлены на каком-нибудь материале с грубой фактурой: досках, фанере, картоне. Криминалист В.Сорокин предложил вместо существующего способа опыления следов цветными порошками использовать в подобных случаях магнитную кисть, представляющую собой небольшой магнит с узким полюсом, который проносят над исследуемой поверхностью в нескольких направлениях.

Перед этим магнит опускают в сосуд с мельчайшими железными опилками. Опилки облепляют полюс в виде всем известной "бороды" магнита. Эта борода и играет роль тончайших щетинок кисти. При проведении магнитной кистью над загрязненной поверхностью железные пылинки прилипают к потожировому веществу следа и окрашивают его в характерный темно-серый цвет. Незагрязненная поверхность остается чистой. Окрашенные железной пылью отпечатки пальцев очень хорошо копируются на дактилоскопическую пленку.

Это не единственное применение магнита в криминалистике. В журнале "Советская милиция" сообщалось о портативном мощном электромагните, применяемом для добычи вещественных доказательств со дна водоемов. В том же номере описывался случай, когда следователю с помощью такого электромагнита удалось обнаружить на дне заброшенного пруда топор, которым было совершено преступление.

Этот же принцип используют для подъема железных предметов с затонувших судов.

Подъемные магниты очень широко используют там, где необходимы особо большие усилия и несложные крепления. Например, в знаменитом батискафе профессора Пикара, исследовавшего глубочайшие океанские впадины, мощный электромагнит был применен для удержания железного балласта. В случае аварии Пикар мог разомкнуть цепь питания электромагнита и, освободив батискаф от балласта, немедленно всплыть.

Электромагниты использовались и на транспорте. Так, для улучшения сцепления колес вагонеток с рельсами (увеличение трения) инженеры еще в 1910г. применили подмагничивание колес с помощью электромагнитов. Используя электромагниты, удалось увеличить коэффициент трения и, следовательно, массу перевозимого груза.

Этим, безусловно, не ограничиваются возможности применения магнитов на транспорте. Существует, например, идея, выдвинутая инженерами фирмы "Вестингауз", предложившими использовать "магнитные подушки" для электровоза. В конструкции американских инженеров магниты, вмонтированные в корпус электровоза, создадут отталкивание между электровозом и железными направляющими рельсами, что позволит обойтись без колес и повысить скорость поездов до 1000 км/ч. Испытания моделей таких электровозов дали обнадеживающие результаты. Во многих странах уже созданы экспериментальные поезда "на магнитной подушке".

Электромагниты можно также использовать для стыковки кораблей в космосе. Другим немаловажным применением электромагнитов может стать магнитная обувь космонавтов, незаменимая, по-видимому, не только в условиях невесомости, но и при ремонтных работах на земле.

В годы войны беспокойная мысль конструкторов электромагнитов сразу же "нащупала" возможность применения их в военных целях. Непосредственно перед войной были изобретены магнитные мины, т.е. мины, боек которых приводился в действие поворотом магнитной стрелки, влекомой стальной машиной корабля.

Другим, значительно более проблематичным предложением стала старая идея использовать электромагнит для ловли ядер противника. Предполагалось осуществить эту идею следующим образом: на корабле "лицом" к противнику устанавливается мощный электромагнит, полюс которого покрыт прочной броней. Ядра неприятеля притягиваются этим магнитом и попадают на броню. Остальная часть корабля может быть незащищенной.

Конечно, такой проект вряд ли осуществим. Стрельба со своего корабля будет малоэффективной, так как траектория будет искажаться магнитом, вследствие чего прицельный огонь станет невозможным. Далее, и это особенно важно в данном случае, для искривления пути неприятельских ядер понадобится такой мощный магнит, который и в настоящее время ученые построить не в состоянии.

Следует, однако, отметить, что проект защиты фортов от ядер противника не остался лишь на бумаге. Магнит-броня, заранее обреченный на бездействие, был построен. Это произошло потому, что техника расчетов магнитного поля в прошлом веке была недостаточно разработанной, и заранее знать, каково будет поле магнита и, следовательно, его эффективность, было нельзя. В 1887г. майор американского флота Кинг приказал сделать гигантский электромагнит из двух крупнейших береговых орудий калибром 36 см, поставленных рядом в форте Виллетс-Пойнт. Магнитная цепь замыкалась с помощью притороченных к пушкам железнодорожных рельсов. Пушки, каждая из которых была по 5 м длиной и весила 25 т, были обмотаны многожильным торпедным кабелем длиной 14 миль. Для питания использовался электрогенератор, обычно применявшийся для ламп прожекторов. При включении тока к жерлам пушек притягивались толстые стальные плиты, которые могли быть оторваны лишь при усилии 10 т. У жерла пушки могли висеть, как гроздь, одно под другим четыре ядра, каждое массой 120 кг. Те, у кого в карманах или руках были небольшие стальные предметы, начинали чувствовать приближение к пушке за 2 м. Действие же пушек на магнитную стрелку, как писали авторы, распространялось более чем на 10 км! Что же касалось неприятельских ядер... их пушка не притягивала.

Надежды майора Кинга на то, что магнитная пушка станет полезной уже тем, что будет "сбивать с толку" стрелки компасов неприятельских кораблей при их подходе к форту, тоже были необоснованными. Дело в том, что на самих кораблях имеются сотни различных магнитов и массивных стальных устройств, которые, не будь приняты специальные меры, не дали бы возможности правильно вести судно. Существует специальная наука "компасное дело", которая разрабатывает способы защиты от магнитных полей своих корабельных устройств не то что от поля, хотя и мощного, но далекого магнита — гигантской магнитной пушки.

Особым толчком к развитию этой науки послужили аварии у берегов Ирландии в 1860г. двух пассажирских пароходов, сопровождающиеся большим числом жертв; эти аварии произошли из-за погрешностей компасов.

Идея использовать магнитное притяжение находила все новых приверженцев не только среди ученых, инженеров, писателей, но и... среди мистификаторов. Вот одна из на шумевших историй.

Как-то в одном европейском военном ведомстве произошел большой переполох. Ведомство всегда осаждали изобретатели, предлагая то сверхдальнобойные пушки, то сверхмощные взрывчатые вещества. И на этот раз изобретатель представил новое взрывчатое вещество. Но удивительное было не в этом. В отличие от других изобретателей он попросил посмотреть на свое изобретение в действии. Была составлена авторитетная комиссия, которая прибыла в лабораторию изобретателя.

Посреди лаборатории стоял стол. На этот стол насыпали щепотку новой взрывчатки, на которую ставили тяжелый, в несколько пудов, кусок железа. Изобретатель замыкал ток в цепи, "поджигавшей" новую взрывчатку, и гро-



мадная железная глыба подлетала к потолку. Падая обратно, она в щепы разбивала стол.

Военные были потрясены. Об открытии узнали газетчики. Всю прессу наводнили сообщения о новом сверхмощном взрывчатом веществе, которое сулило переворот в военном деле. Но вот что было удивительно — руководитель военного ведомства не привлек к ответу газетчиков, разгласивших новую военную тайну. Наоборот, он всячески поощрял их.

Изобретатель получил солидную сумму денег и... скрылся в неизвестном направлении. Это показалось подозрительным, и эксперты произвели обследование заброшенной лаборатории. И вот что оказалось: прямо над потолком лаборатории, в комнате наверху, был установлен мощный электромагнит. Замыкая цепь для взрыва, изобретатель замыкал цепь электромагнита. Железная глыба подскакивала к потолку, к магниту. Для того чтобы глыба "не прилипла" к потолку, цепь электромагнита тотчас же разрывалась, и глыба летела вниз.

Знал ли руководитель военного ведомства об этом, остается загадкой. Однако психологическое воздействие на другие страны газетная шумиха оказала большое.

Другой мистификатор путешествовал по Европе. В середине 80-х годов пронеслась волна об ученом слоне, который умел не только складывать и вычитать, но даже умножать, делить и извлекать корни. Делалось это следующим образом. Дрессировщик, например, спрашивал слона: "Сколько будет семью восемь?" Перед слоном стояла доска с цифрами. После вопроса слон брал хоботом указку и уверенно показывал цифру 56. Точно так же производились деление и извлечение квадратного корня. Фокус также был достаточно прост: под каждой цифрой на доске был спрятан небольшой электромагнит. Когда слону задавался вопрос, в обмотку магнита, расположенного под цифрой, означавшей правильный ответ, подавался ток. Железная указка в хоботе слона сама притягивалась к правильной цифре. Ответ получался автоматически. Несмотря на всю простоту этой "дрессировки", секрет фокуса долгое время не могли раскрыть, и "ученый слон" пользовался громадным успехом.

В средние века весьма распространенным иллюзионным номером были так называемые послушные рыбы, изготовлявшиеся из дерева. Они плавали в бассейне и повиновались малейшему мановению руки фокусника, который заставлял их двигаться во всевозможных направлениях. Секрет фокуса был чрезвычайно прост: в рукаве у фокусника был спрятан магнит, а в головы рыб вставлены кусочки железа. Один из вариантов этого фокуса вы можете приобрести в "Детском мире" — это игра "Удильщик".

Более близкими к нам по времени были манипуляции англичанина Джонаса. Его коронный номер: Джонас предлагал некоторым зрителям положить часы на стол, после чего он, не прикасаясь к ним, произвольно менял положение стрелок. Трюк, естественно, проводился с помощью магнита.

Современным воплощением такой идеи являются хорошо известные электрикам электромагнитные муфты, с помощью которых можно вращать

устройства, отделенные от двигателя какой-нибудь преградой, например стеной.

До сих пор не ясен трюк с магнитом, который проделывал в своем "Храме очарований, или механическом, оптическом и физическом кабинете Гамулецкого де Колла" известный русский иллюзионист Гамулецкий. Его "кабинет", просуществовавший до 1842г., прославился помимо всего прочего и тем, что посетители, поднимавшиеся по украшенной канделябрами и усталанной коврами лестнице, еще издали могли заметить на верхней площадке лестницы золоченую фигуру ангела, выполненную в натуральный человеческий рост, которая парила в горизонтальном положении над дверью кабинета не будучи подвешенной. В этом мог убедиться каждый желающий. Когда посетители вступали на площадку, ангел поднимал руку, подносил ко рту валторну и "играл на ней, шевеля пальцами самым естественным образом".

"Десять лет, — говорил Гамулецкий, — я трудился, чтобы найти точку и вес магнита и железа, дабы удержать ангела в воздухе. Помимо трудов немало и средств употребил я на это чудо".

По-видимому, роль атрибута иллюзионистов как нельзя более подходила таинственному камню — магниту.

На рубеже XIX и XX столетий необыкновенной популярностью пользовались так называемые спиритические сеансы. Сеансы эти проводились по-разному, однако суть их всех сводилась к тому, что спирит или медиум, ведущий этот сеанс, получал тем или иным способом "сигналы" из загробного мира. С помощью этих сигналов участники спиритических сеансов могли "связаться" с любым умершим лицом — великими полководцами и куртизанками древности, умершими родственниками и т.п. Сигналы из загробного мира были различными. Иногда это были толчки стола, на котором лежали руки людей — участников сеанса.

Секрет стола был необычайно прост — в его ножке помещалась батарея, а под столешницей — небольшой электромагнит с якорем. Лицо, ведущее спиритический сеанс, могло посредством особой кнопки замыкать цепь электромагнита, и якорь магнита ударял по столешнице.

## **Сортировщики микрочастиц**

Д.Дальтон и Ч.Вильсон никогда не встречались, они жили с разрывом времени порядка ста лет, но тем не менее именно их труды помогли заметить то, что не видно невооруженному человеческому глазу — движение элементарных частиц. Тут снова придется вспомнить П.Л.Капицу, предложившего совместить первый обнаружитель частиц с магнитом, что породило семейство полезнейших научных приборов...

Эту историю надо начать с Джона Дальтона (1766...1844)., того самого самоучки, который сначала преподавал математику детям в Манчестере, а потом занялся исследованиями воздуха, газовых смесей, составил первую таблицу атомных масс, изучал свойства перегретого пара.

Затем пришла пора Джеймса Прескотта Джоуля (1818...1899). Он учился дома, а к физике его приохотил именно Дальтон. Ученики знали о профессоре по "дальтонизму", цветовой слепоте, но серьезные люди слышали и о соревновании учителя с Гей-Люссаком, помогавшем самому Бертолле, летавшему над Парижем в монгольфьере, но все же отставшем от Дальтона в установлении закона расширения газа при нагревании.

Джоуль стал большим ученым. Он много и весьма успешно занимался магнетизмом. Джоуль поведал миру о существовании предела намагничивания стали, о магнитном насыщении. Джоуль измерил тепло, выделяемое электрическим током. Джоуль заметил магнитострикцию, т.е. изменение объема намагничиваемого железа.

А тем временем, словно следуя заранее известному сценарию, сотни исследователей день за днем приближали появление удивительного магнитного прибора, рождение которого никто, конечно, не мог заранее предполагать.

В 1880г. Э.Гольдштейн отклонил пучок катодных лучей (позднее узнали, что это поток электронов), поднеся к нему магнит. Отрицательный знак заряда этих лучей определил Ж.Перрен, уязвав направление магнитного поля с траекторией пучка. Его опыт уточнил Дж.Дж.Томсон, потом Дж. Лармор предсказал прецессию электронов во внешнем магнитном поле.

В конце прошлого века физики активно разрабатывали интереснейший раздел теории — строение вещества, и самыми действенными инструментами в руках исследователей оказались электрическое (оно ускоряло заряженные частицы) и магнитное (оно искривляло путь частиц) поля.

Сегодня каждому школьнику известно, что магнитное поле отклоняет летящий электрический заряд, ничего другого неизменное во времени магнитное поле делать не "умеет". А тогда, при жизни наших дедов и прадедов, это правило только-только обретало плоть: то Зееман расщепил магнитным полем спектральные линии (1896), то Браун построил катодно-лучевую трубку (1897), то магниты смогли отклонить лучи, испускаемые радием (1899).

В 1907г. Дж.Дж.Томсон, только что получивший Нобелевскую премию за открытие электрона, предложил построить масс-спектрометр, сыгравший огромную роль в физике элементарных частиц. Это сейчас магниты широко применяют для исследования поведения веществ в сильных магнитных полях, для излучения гальваномагнитных, термомагнитных, магнитострикционных явлений, для получения сверхнизких температур (всего лишь на тысячную долю градуса выше абсолютного нуля) методом адиабатического (т.е. без обмена теплом между телом и окружающей средой) размагничивания. Они применяются в квантовых генераторах — лазерах и для анализа частиц по их массе в магнитных масс-спектрометрах.

Принцип магнитной спектрографии используют для разделения изотопов различных элементов. Изотопы, как известно, — это атомы одного и того же элемента, в ядрах которых содержится одинаковое число протонов, но разное число нейтронов. Следовательно, массы ядер изотопов различны, и их орбиты при движении в магнитном поле тоже различны. Траектории движения более

тяжелых ядер меньше искривлены, вследствие чего легкие и тяжелые ядра движутся в магнитном поле по разным орбитам. В сильном магнитном поле могут быть разделены даже очень "похожие" изотопы.

Магнитные спектрографы создавались как бы в три этапа. Сначала Чарльз Вильсон (1869...1959) изобрел камеру для фиксации следов пролета заряженных частиц (1912), за что много позже получил Нобелевскую премию. Вот где пригодились знания Дальтона о перегретом паре! Если резко расширить объем влажного воздуха, то он охладится, и в состоянии перенасыщения ничтожной причины достаточно для конденсации пара. Вот почему камеру Вильсона тщательно очищают от пыли, оберегают от сотрясений. Теперь достаточно одной-единственной заряженной частице пролететь через камеру, чтобы ее путь был отмечен туманным следом. Трек надо осветить, сфотографировать, и визитная карточка гостя попадет в распоряжение ученых.

Камера Вильсона появилась, а тем временем А.Демистр по идее Дж.Дж.Томсона построил первый масс-спектрограф (1918). Через год Ф.Астон создал уже хороший аппарат: частицы не только пролетали зазор конденсатора и пятнышко между полюсами магнита, но, пройдя серию узкоориентированных щелей, попадали на фотопластинку.

Но вот магнит "встретился" с камерой Вильсона, и помог этой встрече П.Л.Капица! Дело в том, что паровая камера не могла ответить на вопрос, какая же частица пролетела. Камера Вильсона предупреждала о появлении частиц, не "опознавая" их.

Выход из этого положения был найден советским физиком П.Л.Капицей, опубликовавшим в 1923г. в журнале Кембриджского философского общества небольшую статью, в которой описывал некоторые эксперименты по наблюдению, следов альфа-частиц в камере Вильсона. Установка П.Л.Капицы представляла собой камеру Вильсона, помещенную в сильное магнитное поле. Что это давало? Мы знаем о том, что в магнитном поле любая заряженная частица движется по кривой, радиус которой обратно пропорционален напряженности магнитного поля и прямо пропорционален массе частицы и ее скорости. Таким образом, зная напряженность магнитного поля и измерив радиус трека частицы в камере Вильсона, можно узнать ее массу и энергию.

Идея П.Л.Капицы о магнитной камере Вильсона нашла приверженцев. Среди них был и американец К.Андерсон, который в 1932г. поместил камеру Вильсона внутри крупного электромагнита со стальным сердечником и полем около 2 Тл. Полюсы магнита были сконструированы таким образом, что создаваемое магнитное поле оказалось совершенно однородным, т.е. во всех точках камеры поле было одинаковым. Это давало возможность более точно определять энергию частиц. Андерсона кроме энергии интересовали еще и знаки заряда частицы. При заданном направлении магнитного поля и известном направлении движения положительно заряженные частицы будут отклоняться в одну сторону, а отрицательно заряженные — в другую.

Исследуя вильсонограммы (так иногда называют фотографии следов в камере Вильсона) космических лучей, Андерсон внезапно увидел поразитель-

ную вещь: частица, по импульсу аналогичная электрону, отклонялась магнитным полем так, как если бы она была заряжена положительно. Андерсон твердо знал, что электрон так отклоняться в магнитном поле не может, поскольку он обладает отрицательным зарядом и должен отклоняться в противоположную сторону.

Противоречия можно было бы примирить, если бы приписать этому "электрону" положительный заряд. Существование "антиэлектрона", обладающего положительным зарядом, было предсказано в 1928г. молодым английским физиком Полем Дираком на основе анализа "квантовых" уравнений движения электрона.

Частица, открытая Андерсоном, действительно оказалась антиэлектроном, или, как его теперь называют, позитроном. Это была первая обнаруженная человеком частица из антимира. Ее открытие было бы крайне затруднительно без сильного магнитного поля, без мощного магнита. Так, академик Д.В.Скобелевын, напавший на след позитрона гораздо раньше Андерсона, упустил его, поскольку магнит Скобелевына давал поле лишь 0,3 Тл.

Камера Вильсона была незаменимым лабораторным устройством до тех пор, пока энергии (скорости) излучаемых в ней частиц были относительно невелики. Но в 50-х годах в СССР, США и других странах вступили в строй гигантские ускорители, способные сообщать частицам колоссальную скорость. Энергия частиц была при этом столь велика, что они беспрепятственно пронизывали камеру Вильсона и почти не отклонялись магнитным полем. Это и не удивительно — камера Вильсона заполнена газом, почти не представляющим собой преграды для частиц. Частицы столь больших энергий необходимо было исследовать по-другому.

Камеру Вильсона Капица "доделал" основательно, но резервы ее улучшения уже иссякали. В 1948г. Нобелевскую премию получил П.Блэкетт, который пристроил к камере Вильсона множество счетчиков элементарных частиц, которые при необходимости включали камеру и отключали ее, когда она простаивала без дела. Но гораздо более серьезное предложение сделал американец, физик Дональд Глезер, ученик Андерсона. И если Андерсон открыл позитрон-антиэлектрон, то заслуга Глезера была не меньше: он открыл "антикамеру Вильсона" — пузырьковую камеру.

Поучительна история этого открытия. Поучительна потому, что она еще раз убедительно показывает, что человек, одержимый какой-то идеей, способен видеть в известных вещах только ему одному понятные явления, улавливать лишь для него очевидные ассоциации, приводящие в конце концов к открытию.

Дональд Глезер в течение долгого времени мучительно искал материал, твердый или жидкий, находящийся в таком неустойчивом равновесии, которое могла бы нарушить даже одна-единственная атомная частица. В этом случае частица, непредставимо эфемерная, могла бы оставить за собой видимый глазом след, который состоял бы, например, из пузырьков испарившейся жидкости. Временами Глезер терял надежду — слишком ничтожной казалась

вероятность испарить энергией единственной частицы заметное количество жидкости.

Однажды Глезеру попала на глаза тридцатилетней давности статья Кенрика, Гильберта и Визмера о "странной жидкости" — диэтиловом эфире, нагретом до  $140^{\circ}\text{C}$ . "Странность" жидкости заключалась в том, что при этой температуре она обязательно бурно вскипала, однако всегда через различные промежутки времени. Проведя тридцать экспериментов, авторы убедились в том, что промежутки времени перед вскипанием этой "капризной" жидкости образовывали ряд, соответствующий закону случайных событий.

Глезер засел за расчеты, которые показали, что частота вскипания жидкости в точности соответствует возможности попадания в колбу космических лучей, т.е. отдельных атомных частиц с высокой энергией. Так была открыта первая жидкость, пригодная для использования в пузырьковой камере, за создание которой Глезер получил в 1960г. Нобелевскую премию.

Пузырьковая камера действительно может быть названа "антикамерой Вильсона": если в камере Вильсона след частицы составлен капельками жидкости, осевшими на ионизированных атомах, то в пузырьковой камере, наоборот, след состоит из пузырьков газа, образовавшихся в исходной жидкости за счет тепла, выделенного при образовании заряженных ионов. В пузырьковой камере применяют органические жидкости или ожиженные газы. Первая лабораторная модель камеры была с наперсток. Сегодня полезные объемы пузырьков камер различны — от нескольких долей литра до нескольких сот литров. Различаются и магниты, используемые с этими камерами. Для советской фреоновой камеры диаметром 115 см и глубиной 50 см изготовлен магнит с полем 2,65 Тл и массой 72 т.

Существуют еще более крупные камеры и магниты. В США построена, например, жидководородная пузырьковая камера объемом 600 л. В Советском Союзе, в Дубне пущена крупнейшая в мире пропановая камера диаметром 2 м. Эта камера установлена на одном из антипротонных каналов дубнинского синхрофазотрона.

Довольно крупная жидководородная камера диаметром около 5 м "Мирабель" установлена в Протвино на Серпуховском ускорителе для фиксации последствий удара протонов, ускоренных до 76 ГэВ, в ядро-протон атома водорода. Именно камеры такого типа дают две трети всей новой информации об элементарных частицах, поэтому нет ничего удивительного в готовности физиков идти на любые расходы по созданию магнито-жидководородных регистраторов. "Мирабель", например, выглядит трехэтажной башней, в центре которой расположена камера, окруженная сложными инженерными сооружениями, куда входит магнит, ожижитель водорода ( $-246^{\circ}\text{C}$ !), системы автоматического управления режимами и измерений. Полученная информация использовалась для совместной работы советских ученых и физиков из Французского центра ядерных исследований в Саклэ.

В последнее время для создания пузырковых камер, особенно больших, широко используют сверхпроводниковые магниты. Это позволяет резко сни-

зить размеры, массу и энергопотребление магнитной системы. В недалеком будущем такие системы, по-видимому, будут обходиться и дешевле обычных.

## **Электронный парамагнитный резонанс**

О применении магнетизма можно рассказывать много, но никак нельзя умолчать об открытии электронного парамагнитного резонанса (ЭПР). Дело было так.

После революции магнитная лаборатория Московского университета, которой было присвоено имя Максвелла, вписала яркие главы в теорию магнетизма. Еще в 1913г. ученик П.И.Лебедева В.К.Аркадьев заметил первый магниторезонансный эффект — поглощение ферромагнетиками высокочастотных электромагнитных колебаний.

"Исследования полного спектра вещества, — писал Аркадьев, — открывают перед нами возможность проникнуть в геометрическое распределение зарядов отдельных атомов и молекул, изучить строение их и подойти к решению самых разнообразных физико-химических вопросов, Эта огромная задача, которую электронная теория материи ставит спектральному анализу, открывает спектроскопии широкое поле интересной и плодотворной работы, но она требует для своего решения ряда систематически проведенных исследований в разных частях спектра... Ближайшей задачей является определение полос поглощения по всей доступной нам шкале электромагнитных волн..."

Это все та же великая лебедевская программа изучения процессов взаимодействия излучения с веществом. Работы Аркадьева вызвали большой интерес. П.Эренфест писал ему в Москву 20 июня 1913г.: "Я вчера рассказывал о Ваших магнитных работах Вейссу и Эйнштейну. Оба проявили большой интерес к Вашим опытам и к Вашим идеям".

Е.К.Завойский начал свои исследования еще до войны, в 1939г., и уже в мае 1941г., экспериментируя на протонах, впервые с группой коллег наблюдал странные сигналы, которые из-за старого, то и дело замыкающего электромагнита, носили нерегулярный характер. Война прервала работы, провести контрольные опыты не удалось, материалы не были опубликованы. А эти сигналы подавала им природа, готовая поведать ученым об одном из заветнейших ее секретов. За открытие ядерного магнитного резонанса американские физики Ф.Блох, Р.Паунд и Е.Пёрселл были удостоены в 1946г. Нобелевской премии по физике.

Во время войны Завойский, изучая поглощение радиоволн парамагнетиками, обратил внимание на явно выраженный максимум поглощения, смещавшийся в сторону более сильных магнитных полей при повышении частоты волн, — это определенно указывало на резонансную природу эффекта.

В 1943г. из эвакуации в Москву возвращается П.Л.Капица (опять Капица, патриарх магнетизма XX века!). Он привез с собой Е.К.Завойского, который в ту пору заведовал кафедрой физики Казанского университета имени В.И.Ульянова-Ленина. Без сильных сотрудников, с плохеньким оборудованием ему

удалось открыть ЭПР! Парамагнетик мог поглощать энергию, когда при некоторых частотах поля электроны "переворачивались" другим, высокочастотным полем. Как тут не вспомнить про исследования Столетова, изучавшего намагничивание мягкого железа!

Капица предложил Завойскому продемонстрировать эффект на оборудовании Института физических проблем в Москве и исследовать эффект при низких температурах. Вместе с Завойским над созданием экспериментальной установки работал будущий академик А.И.Шальников.

В 1974г., когда праздновали восьмидесятилетие П.Л.Капицы, Е.К.Завойский преподнес ему в качестве подарка макет своей знаменитой теперь установки. Вот какой текст сопровождал подарок:

"Глубокоуважаемый Петр Леонидович!

Вы — первый физик, оценивший электронный парамагнитный резонанс. В день Вашего юбилея в память об этом прошу принять Вас то, что сохранилось... 1946г. Институт физических проблем. Подвал. Установка по изучению ЭПР в диапазоне длин волн 10 см на клистроне, собранная из деталей: клистрон — американский, высокочастотный кабель — немецкий. Остальная аппаратура была отечественной. Не все сохранилось. Но в памяти осталась атмосфера дружелюбия. Вы и Александр Иосифович Шальников во многом определили счастливую судьбу ЭПР. 1974г.

Ваш Е.К.Завойский"

Открытие Завойского сильно продвинуло исследования, которые позднее привели к созданию мазеров и лазеров, а также способствовали обнаружению новых, близких по природе к ЭПР, физических эффектов — ядерного парамагнитного резонанса, ферромагнитного и антиферромагнитного резонанса, акустического парамагнитного резонанса и др. За свое открытие Завойскому в 1957г. была присуждена Ленинская премия.

## **Пирамиды ядерного века**

Еще Демокрит был уверен, что, разрезая яблоко пополам, половинки — еще пополам, четвертинки — снова пополам и так далее, можно дойти до мельчайших "атомов" материи. Древнегреческий философ был прав; на 90-м раздвоении перед ним "лежало бы" два атома. Но где взять "нож" для столь тонких разрезов? Сегодня нужные инструменты есть, к их созданию причастны великий Лоуренс и не менее великий Векслер, трудами которых вошли в практику ускорители элементарных частиц. Существование последних без магнитов немыслимо.

О людях эпохи, об уровне развития ее науки и искусства мы судим прежде всего по сохранившимся памятникам. Египетские пирамиды, римские акведуки, русские иконы, флорентийские фрески, пещеры Аджанты, средневековые европейские соборы, более близкие к нам по времени плотины и телескопы являются уникальными символами ушедших эпох, подчас точнее воссоздающими те времена, чем пухлые тома хроник. А среди памятников, которые



оставит после себя наш беспокойный век, быть может, наиболее яркими будут заброшенные к тому времени гигантские ускорители, которые, как нельзя лучше, характеризуют ядерный век: состояние его науки, техники, искусства, его материальные возможности и даже отношения между людьми и народами. Ускорители — это пирамиды нашего века... Люди, причастные к этим творениям, окружены заботой и вниманием; на них смотрит с восхищением весь мир; они находятся на самом переднем крае человеческих знаний и мастерства; перед ними неизведанные глубины вечности, космоса, материи, человеческой души... Счастливы те известные и неизвестные избранники, которые создают современные ускорители — пирамиды ядерного века...

Это очень человеческая черта — присваивать одной яркой и незаурядной личности заслуги, которые правильнее было бы отнести ко многим.

Так стало с Эрнестом Лоуренсом — "изобретателем" циклотрона. Как Колумб не открыл Америки, так Лоуренс не изобрел циклотрона — ускорителя атомных частиц, который за короткое время, благодаря неутомимому любопытству физиков, вырос до исполинских, невероятных прежде размеров. До Лоуренса, вместе с Лоуренсом и после него было много талантливых ученых, которые были бы вправе разделить с ним честь открытия. Так, можно было бы упомянуть харьковских физиков, испытавших на два года раньше Лоуренса устройство, напоминавшее циклотрон. Можно упомянуть и многих других. Но спросите любого физика: "Кто изобрел циклотрон?" И он ответит без колебаний: "Лоуренс".

Человек, который бы вдруг оказался на захлавленной территории Калифорнийского университета в 1932г., мог заметить небольшое, буквально разваливающееся на глазах здание, размещавшееся на пути в учебные химические лаборатории. Из здания доносился натужный вой генераторов, сыпались искры, тлели огоньки в ртутных выпрямителях. Все вокруг было залито светом мощных ламп. Суетились какие-то люди. Здесь создавался циклотрон. Руководил работами Лоуренс.

Жизнь Эрнеста Лоуренса напоминает жизнь "типичного" счастливчика. Да, у Лоуренса были все основания считаться счастливым. Как и большинство известных физиков своего времени, он учился в нескольких университетах: Миннесотском, Чикагском и Йельском. Еще раньше, в школе, его интерес к физике был поддержан учителем Эйки. В Йельском университете Лоуренс получил степень доктора философии (примерно соответствует степени кандидата физико-математических наук) за его исключительные способности к экспериментированию. Так, во время обучения в Йельском университете еще в 1925г. он предложил принципы осуществления цветного телевидения, а позже самостоятельно построил такой телевизор (В 1965г. японскими фирмами был выпущен в продажу цветной транзисторный телевизор, работающий по принципу, предложенному Лоуренсом.), предложил способ измерения отрезков времени порядка одной миллионной доли секунды и т.д.

Особый интерес Лоуренса вызывало в то время ускорение ионов. Как это сделать? В книге одного из наиболее известных создателей уникальных совет-

ских ускорителей Е.Г.Комара "Ускорители заряженных частиц" сопоставляют- ся различные методы ускорения вещества. Действительно, что значит ускорить частицу, придать ей энергию? Это значит увеличить ее скорость. Бросая камень, вы ускоряете заряженные частицы, входящие в атомы камня. Ускорить частицы можно и другим способом, например, выстреливая ими из ружья.

Рассмотрим этот случай. Пусть пуля массой 100 г летит со скоростью 1 км/с. Какова кинетическая энергия пули? Она может быть рассчитана по известной формуле:  $E = mv^2/2 = 100 \cdot 10^{10}/2 \text{ эрг} = 3,13 \cdot 10^{17} \text{ МэВ}$ . Казалось бы, стрельба — идеальный метод для ускорения частиц, поскольку с небольшими затратами мы получили огромную энергию. Однако все обстоит не так просто. Эта колоссальная энергия распределяется между частицами, и энергия каждой частицы в отдельности, определяющая интенсивность ядерных превращений, будет, конечно, ничтожной. Так, на каждый протон такой системы приходится всего 0,005 эВ энергии, чего, естественно, совершенно недостаточно.

А что, если увеличить скорость пули? Скорость стоит в формуле для энергии в квадрате и сильно влияет на степень ускорения. Расчеты, однако, показывают, что увеличение скорости даже до космической также не приводит к достижению достаточной энергии элементарных частиц.

Может быть, использовать для ускорения частиц идею, положенную в основу работы всех электродвигателей? Пусть у нас будет очень длинный электромагнит — порядка нескольких километров с полем в зазоре около 2 Тл. Если теперь в зазоре этого электромагнита разместить проводник с током, то проводник начнет двигаться. К концу своего движения он может приобрести значительную энергию, если, конечно, не расплавится (чем большее хотим получить ускорение, тем большую плотность тока в проводнике мы должны обеспечить). Это расплавление происходит в обычных проводниках уже при скорости  $10^7 \text{ см/с}$ , его явно недостаточно для ускорения при высоких энергиях.

Наиболее эффективным методом ускорения заряженных частиц оказывается их ускорение в электрическом поле. Под влиянием разности потенциалов 1 млн В частица приобретает энергию 1 МэВ.

Однажды, занимаясь в библиотеке, Лоуренс прочитал статью немецкого автора о двух вакуумированных трубках, между которыми было электрическое поле. Заряженная частица, перескакивая из трубки в трубку, значительно увеличивала свою энергию.

"А почему бы, — подумал Лоуренс, — не соединить подряд четыре, десять, сто трубок? Тогда мы могли бы в соответствующее число раз увеличить и энергию частицы, может быть, довести ее до такой, которая будет достаточной, чтобы разбить атом?.. Наверное, это возможно... Но тогда установка будет очень длинной, может быть, несколько километров в длину... А что, если свернуть эти трубки в спираль? Тогда их можно будет разместить на небольшом пространстве... Но частицы движутся прямолинейно... Как заставить их бежать по спирали? Частицы движутся прямолинейно не всегда: попав в магнитное поле, частицы начинают двигаться по кругу... Значит, нужно при-

менить магнитное поле — разместить эту спираль из трубок между полюсами магнита..."

Так Лоуренс открыл принцип действия циклотрона. Это открытие оказало сильнейшее влияние не только на жизнь самого Лоуренса, но и на дальнейшее развитие ядерной физики.

Однако идея — это еще не все. И хотя две небольшие модели, построенные Лоуренсом, свидетельствовали о правильности нового принципа, нужно было довести этот принцип до возможности его практического использования. В течение пяти лет Лоуренс вместе со своими студентами работает над проблемами обеспечения сверхвысокого вакуума, создания мощных высокочастотных генераторов, подбора магнита.

Нужно было спешить. Ускорители того времени уже давали протоны с энергией до 0,8 МэВ. Согласно работам Эрнеста Резерфорда и некоторым выводам квантовой механики, протоны с энергией около 1 МэВ должны расщеплять атомы. Честь первым расщепить атом была настолько заманчивой, что за нее с колоссальным энтузиазмом соревновались несколько всемирно известных лабораторий.

Под руководством Резерфорда работали Кокрофт и Уолтон в Кембридже, самые "опасные" для Лоуренса соперники. Манера исследования Резерфорда заключалась в максимальной простоте, изяществе и чистоте опытов.

На горе Дженоеросо в Швейцарии европейские физики Браш, Ланж и Урбан для ускорения протонов попытались использовать молнию, что дало бы им сразу весьма значительный перевес, поскольку разность потенциалов, которую можно было получить с помощью молнии, очень велика и частицы были бы ускорены молнией до 15 МэВ и выше. Исследователи натянули между соседними скалами металлическую сетку. Во время грозы на этой сетке скапливался значительный положительный заряд. Однажды ученым удалось получить искусственную молнию длиной около 5 м. Это означало, что достигнута энергия 10 МэВ. Однако такое достижение обошлось очень дорого: в результате несчастного случая погиб доктор Урбан...

Тем не менее соревнование продолжалось. И Лоуренс надеялся быть первым. Он всегда улыбался. Он не признавал никаких препятствий: ни финансовых, ни научных, ни технических. Он игнорировал трудности экспериментального и, что гораздо опасней, теоретического характера.

Небольшое деревянное здание, в котором производились первые эксперименты Лоуренса, дало начало грандиозной радиационной лаборатории в Беркли, раскинувшейся на берегу моря на живописных холмах Сан-Франциско, где впоследствии был установлен гигантский фазотрон, на котором сделано одно из волнующих открытий нашего времени — открыт антипротон.

"Антимир начинается в Беркли", — с гордостью говорили берклийцы следующих поколений. Но когда Лоуренс приступал к строительству первого циклотрона, у него были только идея, тысяча долларов и уверенность в том, что он все может, уверенность, не такая уж необоснованная, для "счастливи-

Первое, с чего нужно было начать, — сделать магнит. Однако такой традиционный подход потребовал бы слишком много времени, и поэтому Лоуренс купил громадный восьмидесятитонный магнит, залежавшийся на складе и ранее предназначенный для не выкупленного заказчиком радиопередатчика; Лоуренсу удалось приобрести его буквально за гроши.

Отсутствие радиодеталей восполнялось за счет собственных старых радиоприемников, "заимствования" бесхозных приемников и радиодеталей, а то и просто в результате посещения ближайших свалок.

Механические детали физики делали сами или заказывали на небольших заводах. Вакуумная камера первого циклотрона представляла собой сплюснутую в пламени горелки лабораторную, колбу.

Помогали Лоуренсу в основном студенты. Это, естественно, не было их основным занятием, а потому все было направлено на то, чтобы изготовить циклотрон как можно быстрее. Очень часто работы велись ночью, и перерыв делался лишь в четыре часа утра, когда уставшие студенты и их руководитель шли перекусить в ближайший ночной ресторан "Белая таверна". Все в лаборатории делалось только бегом. Лоуренс был полон энергии и оптимизма, он не замечал мелких неполадок и ошибок и акцентировал внимание только на успехах. Казалось, что его высокую и плотную фигуру можно было видеть сразу в нескольких местах. Его звали "маэстро" за виртуозность в экспериментах и абсолютно точные и уверенные советы, которые он давал сотрудникам. В то же время Лоуренс стремился, чтобы каждый работал творчески и разделял радость открытия, которое, однако, впоследствии будет приписано только ему одному, великому "маэстро".

В 1932г. первый в мире циклотрон был построен. Он давал пучок протонов с энергией 1,2 МэВ, т.е. намного превосходящей ту, при которой атомы могли быть расщеплены. Но Лоуренс опоздал...

Кокрофт и Уолтон, ученики Резерфорда, использовав принципиально другой метод исследования и получив пучок с энергией всего лишь 0,7 МэВ, уже добились в Кавендишской лаборатории искусственного расщепления атома...

Это было для Лоуренса жестоким, но полезным уроком. Он решает теперь направить свои усилия на совершенствование циклотрона и увеличение энергии частиц, получаемых с его помощью, прекрасно понимая, что увеличение энергии частиц даст возможность заняться вопросами взаимодействия частиц, открывающими путь к познанию законов атома. Открытие сделано, теперь необходимо добиваться систематических и достоверных результатов. Вот что по этому поводу говорил Джозеф Томсон, который, по выражению П.Л.Капицы, "из всех физиков конца прошлого и начала этого века сделал самые фундаментальные открытия (открыл электрон и изотопы), в своей книге "Воспоминания и раздумья".

"...Обычно не первый шаг в открытии нового физического явления стоит больших денег. Так, открытие Рентгеном X-лучей, или Кюри радия, или продолжительные опыты Ч.Т.Вильсона над образованием капелек на частицах, заряженных электричеством, — все они стоили ничтожные суммы. Открытия,

подобные этим, обязаны тому, что не может быть куплено, — именно остроте и силе наблюдательности, интуиции, непоколебимому энтузиазму до окончательного разрешения всех затруднений и противоречий, сопутствующих пионерской работе. Когда первоначальное открытие сделано, наблюдаемый эффект очень мал и требует целого ряда длительных опытов для получения достоверных результатов. Вот это стремление добиться большого эффекта и стоит дорого. Это может означать затрату многих тысяч фунтов стерлингов для постройки сильных магнитов, или же для получения электродвижущих сил во много сот тысяч вольт, или же для приобретения больших запасов радия. Но все эти деньги хорошо израсходованы, так как они дают нам возможность добиваться новых знаний гораздо быстрее и с большей достоверностью".

Академик П.Л.Капица сделал по этому поводу такое сравнение:

"Когда Колумб отправился в экспедицию, результатом которой было открытие Америки, он ехал на простом маленьком фрегате, на лодчонке, с современной точки зрения. Но чтобы освоить Америку как страну, потребовалось построить большие корабли, как "Лузитания", "Титаник", и это полностью себя оправдало".

Если первый циклотрон Лоуренса стоил 1 тыс. дол., то синхротрон на 6 тыс. МэВ — 3 млн. дол., а синхротрон Брукхейвенской лаборатории на 30 тыс. МэВ — уже 34 млн. дол. Если при постройке первого циклотрона у Лоренса было всего несколько помощников-студентов, то впоследствии в радиационной лаборатории штат возрос до нескольких тысяч человек.

Сам Лоуренс в свои 38 лет стал одним из признанных великих физиков. Один из его друзей в день получения Лоуренсом Нобелевской премии шуточно телеграфировал ему: "Дорогой Эрнест, ты подаешь некоторые надежды в смысле карьеры..." Вот уже поистине, анекдоты, как сказал Вольтер, есть колоски, остающиеся на поле истории, когда урожай собран.

Какие же задачи призваны решать столь большие коллективы на этих громадных магнитах, перевозимых в нескольких железнодорожных составах и располагающихся в подземных галереях? Член-корреспондент АН СССР Д.И.Блохинцев говорил, что в развитии физики XX века можно выделить три этапа: изучение атома, изучение атомного ядра и, наконец, изучение структуры элементарных частиц. Наряду с продолжением второго и первого этапов сейчас ведутся интенсивные исследования на третьем этапе.

Ускорители имеют в этом смысле двоякое значение. Во-первых, при взаимодействии ускоренных частиц с ядрами других элементов возникают новые частицы, еще не известные науке. Во-вторых, ускоренные частицы, согласно представлениям квантовой механики, можно трактовать как волны определенной длины, причем длина волны тем меньше, чем больше энергия ускоренной частицы. Из физики также известно: с помощью любых волн можно "видеть" лишь те предметы, линейные размеры которых больше длины волны. В противном случае волна "не заметит" препятствия. Поэтому для исследования структуры мелких объектов микромира необходимо иметь волны с возможно меньшей длиной, т.е. максимально ускоренные частицы.

Для решения задач, связанных с исследованиями структуры пространства (не обладает ли пространство квантовыми свойствами?) на расстоянии  $10^{-15}$  см и меньше, а также структуры времени (может быть и время течет не непрерывно, а некоторыми порциями?) в промежутках, равных  $10^{-25}$  с и менее, необходимы ускорители частиц на энергию 1 млн. МэВ (почти в 1 млн. раз больше энергии, полученной Лоуренсом в 1932г.).

С помощью новых мощных ускорителей ученые надеются разрешить многие вопросы. Почему природа избрала именно водород элементом, из которого синтезированы все остальные? Почему материя устойчива? Почему электрический заряд электрона точно равен противоположному по знаку заряду протона? Почему этот заряд равен именно  $1,6 \cdot 10^{-19}$  Кл? Почему протон тяжелее электрона именно в 1846 раз? Не могут ли оказаться гравитационные, электромагнитные, ядерные и слабые взаимодействия лишь различными аспектами единой физической реальности?

Существует ли "пятая сила", кроме перечисленных?

Есть ли в природе монополи — частицы, имеющие только один магнитный полюс и эквивалентные электрическим зарядам? Наконец, можно ли обнаружить "бесы" — кварки, из которых, быть может, состоят все "элементарные" частицы? Не может ли время течь в обратную сторону? Все эти вопросы касаются самых глубин нашего миропонимания.

Профессор Роберт Оппенгеймер, в свое время глава американского атомного проекта, не исключал, что в процессе экспериментов на таких грандиозных ускорителях могут быть сделаны просто потрясающие открытия. Кто сказал, например, что причина всегда предшествует следствию?

"Неизвестно, будет ли иметь смысл традиционное причинное описание событий, т.е. описание, при котором будущее зависит от прошлого непрерывно прослеживаемым образом. В хорошо изученных областях энергии не замечено ничего, что делало бы такие представления о пространстве, времени и причинности неправильными. Высокий уровень энергии запланированных ускорителей поможет разрешить эти вопросы".

Упоенные успехами, Лоуренс и его помощники сразу же после запуска первого циклотрона заложили новую гигантскую машину — "циклотрон-мамонт", "циклотрон-гигант", "циклотрон-монстр". На постройку его были выделены колоссальные средства. Сотни людей участвовали в строительстве.

И вот циклотрон-колосс построен. Мерцающие полированные плоскости его гигантских многометровых магнитов уже готовы к тому, чтобы между ними начал вращаться рой атомных частиц, ускоренных до гигантской по тем временам энергии — 60 млн. эВ.

Но что произошло? Почему проектировщики торопливо проходят мимо еще не пущенного гиганта, стараясь не глядеть на него? Почему все разговоры о машине, сожравшей миллионы, встречают холодное молчание?

При уточнении расчетов выяснилось, что вся эта масса металла бесполезна — лоуренсовский циклотрон в силу присущих ему особенностей и в соот-

ветствии с неумолимой теорией относительности в принципе не может давать частицы энергией выше 25...30 МэВ.

Масса любой частицы возрастает при приближении скорости частицы к скорости света. Но частица с большей массой менее подвижна — она начинает отставать от частиц с меньшей энергией и запаздывает к ускоряющему промежутку, т.е. попадает к нему в тот момент, когда ускоряющее электрическое поле мало или направлено навстречу частице и тормозит ее. Все попытки вырваться из этого порочного круга были тщетны. Ненужный многотонный магнит несостоявшегося рекордного циклотрона пылился в лаборатории уже более четырех лет, когда появились статьи Векслера, где впервые была высказана идея "автофазировки", с помощью которой можно теоретически безгранично повышать энергию частиц, получаемых в ускорителях. Может быть, только физики в состоянии оценить эстетическую сторону этого нового принципа. Частицы сами по себе, повинувшись влиянию электрического поля изменяющейся частоты, приходят к ускоряющему промежутку как раз в тот момент, когда это необходимо — ни на мгновение раньше, ни на мгновение позже.

Те самые исторические три статьи, подписанные до того неизвестным именем — В.И.Векслер — появились в 1944г. в журнале "Доклады Академии наук СССР". Эти статьи открыли новую эпоху в создании ускорителей.

"Нельзя ли использовать это "вредное" для циклотрона нарастание массы частиц при увеличении их скорости в наших целях? — так писал Векслер. — Иными словами, нельзя ли создать такие условия, при которых период обращения частиц, по крайней мере в среднем за много оборотов, автоматически поддерживался бы всегда равным периоду ускоряющего переменного поля именно за счет возрастания энергии частиц? Если бы нам удалось осуществить это требование, то очевидно, что важный для ускорения резонанс мог бы сохраняться сколь угодно долго, т.е. можно было бы ускорять частицы до сколь угодно больших энергий".

Идея Векслера сводилась к тому, чтобы при росте массы частиц повышалось и магнитное поле, что уменьшало бы радиусы их орбит: "При каждом прохождении через щель частицы испытывают разное приращение массы (и соответственно разное приращение радиуса, по которому их заворачивает магнитное поле) в зависимости от напряжения поля между дуантами в момент ускорения данной частицы. Оказывается, что среди всех частиц имеются такие выделенные "удачливые" частицы (они обычно называются равновесными). Для этих равновесных частиц механизм, автоматически поддерживающий постоянство периода обращения, особенно прост.

"Удачливые" частицы при каждом прохождении через щель дуантов испытывают приращение массы и увеличение радиуса окружности. Оно точно компенсирует уменьшение радиуса, вызванное приращением магнитного поля за время одного оборота. Следовательно, "удачливые" (равновесные) частицы могут резонансно ускоряться до тех пор, пока происходит возрастание магнитного поля".

Удивительна, почти неправдоподобна судьба академика В.И.Векслера. Семи лет, в начале первой мировой войны, остался он без отца, погибшего на фронте, и в 1921г. во время голода на Житомирщине, страшной разрухи, навсегда бросил свой сиротский дом и один, без денег оказался в Москве. Он становится беспризорником. Ночует, греясь у асфальтовых чанов, на Хитровом рынке. Во время одной из облав его забирает милиция и направляет в детский дом имени Коминтерна, в дом-коммуну, устроенную в старинном, покинутом хозяевами особняке в Хамовниках.

В том доме поселились 25 бывших беспризорных. Жизнь их была строго регламентирована: ранний подъем, кухонные работы, уборка, завтрак, школьные занятия, обед. Вечером в коммуне работали всевозможные кружки. После ужина в точно обусловленное время — сон. В доме-коммуне царили свои законы. По всем вопросам жизни решение принимали на общем собрании, и оно не подлежало обсуждению, критике и обжалованию.

Здесь, в коммуне, Владимир Векслер необычайно увлекся физикой и однажды поразил своих друзей тем, что сам построил детекторный радиоприемник.

Он оказался прирожденным общественником, всегда был впереди, не пропускал ни одного культурного мероприятия, ни одного посещения театра; он — активный участник антирелигиозной пропаганды, всевозможных коллективных выходов, работ на общественных огородах.

Владимир довольно прилично окончил школу и в 1925г. был отправлен Хамовническим райкомом комсомола Москвы электромонтером на фабрику имени Свердлова. Там он проработал более двух лет и, разумеется, отлично проявил себя как с производственной, так и с общественной стороны. Завод дал ему комсомольскую путевку в институт. В то время шла кампания по совершенствованию вузовской работы, полная всяческих перемен и реформ, частых изменений программ и профилей обучения. Так и получилось, что В.И.Векслер, поступив на очное отделение Плехановского института народного хозяйства, окончил в конце концов экстерном в 1931г. Московский энергетический институт, получив диплом инженера-электротехника. Его узкой специальностью стало рентгеновское оборудование.

К этому времени он работал во Всесоюзном электротехническом институте, в лаборатории рентгеноструктурного анализа, где разрабатывал методы измерения ионизирующего излучения, собственными руками изготавливая нужные установки. Один из его учеников вспоминал впоследствии: "Почти 20 лет он сам собирал, монтировал различные придуманные им установки, никогда не чураясь любой работы. Это позволило ему ясно видеть не только фасад современной физики, не только ее идейную сторону, но и все, что скрывается за окончательными результатами, за точностью измерений. Весьма характерно, хотя это и не единственный в истории науки пример, что один из крупнейших современных физиков по образованию инженер. Правда, к В.И.Векслеру не следует подходить с обычной меркой. Формальный образовательный ценз для него очень мало значил. Он всю жизнь учился и переучивался. И до самых



последних лет жизни, вечерами, в отпуске, он тщательно изучал и конспектировал теоретические работы. Многократные длительные поездки из Дубны в Москву он также использовал для бесед на научные темы и учебу.

В 1936г. в жизни Векслера произошло важное событие. Им заинтересовались молодые сотрудники Физического института Академии наук (ФИАН) И.М.Франк, П.А.Черенков, Л.В.Грошев.

И вот И.М.Франк предложил ему сделать доклад на семинаре, потом Векслера пригласили к С.И.Вавилову, последовало обучение в докторантуре ФИАН.

Поначалу Векслер занялся космическими лучами, потом пришлось заняться лоуренсовским циклотроном. Построить циклотрон, подобный лоуренсовскому, оказалось делом нелегким. Хотя уже в середине 30-х годов циклотрон с диаметром полюсных наконечников примерно в метр, как у Лоуренса, был создан в Ленинграде, только к 40-му году, благодаря кипучей энергии И.В.Курчатова и его коллег, удалось запустить в работу первую в Европе "атомную дробилку", как тогда называли циклотрон. Вавилов понимал, что глубокие исследования в области ядерной физики невозможны без постройки мощного ускорителя. Уже в то время он предложил создать самый крупный в мире ускоритель, диаметр полюсных наконечников которого должен был составить несколько метров. Многим и через тридцать лет такое смелое решение казалось невероятным. Но оно было принято и начало воплощаться в жизнь. Была укомплектована циклотронная бригада. В нее вошли В.И.Векслер, С.Н.Вернов, Л.В.Грошев, П.А.Черенков и Е.Л.Фейнберг. Тут же П.А.Черенков и С.Н.Вернов стали изготавливать модель будущего циклотрона. Подобрали магнит, еще небольшой, с диаметром полюсов около тридцати сантиметров, тщательно обработали полюсы. Продолжению этих работ помешала война".

Вновь эта идея возникла в 1943г., когда для осуществления советской атомной программы потребовалось создать мощный ускоритель, настолько мощный, что принцип циклотрона Лоуренса уже не годился. Полностью идея нового ускорителя созрела у Векслера на рубеже 1944г. Уже в начале 1944г. С.И.Вавилов собрал в своем директорском кабинете экстренное заседание Ученого совета. Там Векслер сделал свое сообщение. Обсуждение было бурным. Предложение Векслера казалось фантастическим, нереализуемым. Но — физически неуязвимым...

"Сотрудников В.И.Векслера, — вспоминает профессор М.С.Рабинович, — всегда поражала его не столько потрясающая работоспособность, сколько не знающая удержу фантазия. Беседуя со своими учениками, он часто говорил: "У меня есть некоторая идея, которую я хотел бы обсудить". Начинался жаркий спор. Идея подвергалась ожесточенной критике. Температура дискуссии быстро поднималась. Все присутствующие изо всех сил старались опровергнуть новое предложение. Спор продолжался и в следующие дни. Иногда, чтобы разобраться, требовалась большая теоретическая работа. После такой работы спор продолжался. На возражения следовали контрвозражения. Для нас — учеников В.И.Векслера — такой метод разработки различных физических

идей явился превосходной школой. Она много давала, но одновременно и много требовала. Не каждый мог выдержать такую работу в течение многих лет, но можно назвать многих ученых, которые прошли подобную школу идей у В.И.Векслера. Многие из его учеников сами в настоящее время стали руководителями больших коллективов научных сотрудников".

Больше всего В.И.Векслер любил работать с молодежью, особенно с молодыми теоретиками. И это понятно. При бурной творческой работе у В.И.Векслера возникало много идей, иногда были и неправильные, но большей частью весьма интересные и настолько на первый взгляд необычные, фантастические, что они вызывали у многих физиков, привыкших к традиционному, медленному, "солидному" движению по дороге науки, возражения, порой даже насмешку и нежелание спорить по существу. К сожалению, некоторые, даже очень хорошие физики настороженно встретили его самую блестящую идею — принцип автофазировки, который привел к принципиально новым методам создания ускорителей заряженных частиц. Поэтому В.И.Векслеру было проще с молодежью, которая только вырабатывала свой стиль работы.

Идея автофазировки понравилась Л.Н.Мандельштамму, статьи В.И.Векслера были молниеносно переведены на английский язык (несколько позже аналогичное предложение выдвинул американец Э.М.Макмиллан).

Наконец-то Лоуренс смог возобновить работы на заброшенном циклотроне, и уже через несколько месяцев на нем были получены частицы с энергией 500 (!) МэВ. Но это был уже не циклотрон, а совершенно новая машина — синхроциклотрон.

Однако, прежде чем перейти к описанию этой новой машины, обратимся к некоторым физическим явлениям, лежащим в основе процесса ускорения заряженных частиц.

Лоуренс первым использовал магнитное поле для возвращения частиц к одним и тем же ускоряющим промежуткам. Известно, что любая заряженная частица, двигаясь в магнитном поле, будет двигаться по окружности. В двух точках такой окружности Лоуренс расположил ускоряющие промежутки. Вот для этого Лоуренсу и понадобился старый магнит, завалявшийся на складе Калифорнийского университета.

С ростом энергии частиц, получаемых в ускорителе, увеличивается радиус орбит, по которым вращаются частицы, а вместе с ним и диаметр магнитов. Поэтому-то самые большие магниты в мире — это магниты ускорителей.

Заряженная частица подвержена в циклотроне влиянию двух сил: центробежной, которая стремится "выбросить" частицу из циклотрона, и центростремительной лоренцевой силы, которая заставляет частицу двигаться по окружности. Если в какой-то точке орбиты напряженность, скажем, резко падает до нуля, частица в этой точке, не сдерживаемая лоренцевой центростремительной силой, выскочит из циклотрона.

Исходя из этих соображений, напряженность поля по орбите циклотрона устанавливают строго постоянной. Равенство центробежной и центростремительной сил на равновесной орбите обеспечивает так называемую горизон-

тальную устойчивость частицы. Что это значит? Предположим, что частица под влиянием каких-либо сил перешла с равновесной орбиты на орбиту большего радиуса. В этом случае лоренцева центростремительная сила будет больше центробежной, и в результате частица начнет смещаться в сторону орбиты меньшего радиуса до тех пор, пока не достигнет равновесной орбиты. При уменьшении радиуса орбиты частицы наблюдается обратная картина.

А что случится, если частица перейдет на более низкую или более высокую орбиту? Если полюсные наконечники магнита параллельны друг другу и магнитные силовые линии, которые должны быть перпендикулярны к стальным поверхностям, представляют собой параллельные прямые, то при смещении орбиты вверх или вниз частица не "замечит" каких-либо изменений в магнитном поле. Все орбиты — средняя, более низкая и более высокая — будут для частицы равноценными, что приведет в конце концов вследствие неидеальности изготовления поверхностей полюсов к тому, что частицы "потеряются" в полюсах магнита.

Чтобы этого не произошло или, как говорят, для обеспечения "вертикальной устойчивости" или "вертикальной фокусировки" движения частицы, полюсы магнитов скашивают так, чтобы зазор к краю полюса становился больше. В действительности, однако, скашивают не сами полюсы, а магнитные крышки вакуумной камеры, в которой происходит ускорение.

В этом случае поле магнита ускорителя изменится: если непосредственно под центром полюса силовые линии по-прежнему будут прямыми, перпендикулярными плоскостям полюсов, то на внешнем крае полюса силовые линии будут выгибаться наружу, образуя так называемое бочкообразное выпучивание силовых линий. Бочкообразное магнитное поле характерно тем, что на его "экваториальном обруче" поле минимально, а с продвижением вверх или вниз оно увеличивается. Частица, движущаяся в таком поле, не может "упасть" на полюс магнита, так как в этом случае ей пришлось бы перейти из области со слабым полем в область с сильным полем, т.е. затратить некоторую энергию.

Сам полюс имеет коническую форму, поскольку по высоте полюса от него отпочковываются магнитные силовые линии потока рассеяния. Таким образом, чем дальше идти вдоль полюса от рабочей зоны, тем больший магнитный поток по нему проходит.

Что было бы, если бы полюс был цилиндрическим, а его сечение постоянным по высоте? В этом случае индукция в полюсе, в его части, близкой к рабочей зоне ( $B = \Phi/S$ , где  $\Phi$  — магнитный поток;  $S$  — сечение пути магнитного потока), была бы очень низкой, а вдали от рабочей зоны — чрезмерно высокой. Получилось бы, что полюс в различных его сечениях загружен поразному и, главное, неразумно. Чтобы этого не происходило, полюсам придают коническую форму. Тогда меньшему потоку будет соответствовать меньшее сечение, и индукция во всех сечениях станет одинаковой, а полюс равномерно нагруженным. Стараются сделать так, чтобы индукция в полюсе была равна индукции в рабочей зоне, т.е. 1,4... 1,7 Тл.

Почему нельзя выбрать большую индукцию? В принципе это возможно, однако при более высокой индукции сердечник магнитопровода будет сильно насыщен, и чтобы провести по нему магнитный поток, потребуется большой намагничивающий ток. Кроме того, если полюсы насыщены, трудно обеспечить нужное распределение магнитного поля в рабочей зоне.

Конические полюсы электромагнита циклотрона чаще всего изготавливают из одной стальной поковки. На полюсах закрепляют главные катушки, создающие сильное магнитное поле. Их обычно изготавливают из толстой (сечением 50... 100 мм ) медной или алюминиевой шины с отверстием внутри для охлаждающей воды.

Кроме основной в циклотронах имеется дополнительная обмотка, расположенная около зазора. Она состоит из двух катушек, размещенных вблизи среза полюса. Эти катушки предназначены для "нацеливания" частиц на мишень, иными словами, для регулирования высоты плоскости, по которой движутся частицы в циклотроне. Эта плоскость, вопреки ожиданиям, обычно находится не посередине между полюсами из-за различных случайных факторов. Сейф, стальная дверь, баллон с газом, оказавшиеся поблизости, могут вызвать смещение средней плоскости.

Один из крупнейших электромагнитов описанного типа установлен в синхроциклотроне на 660 МэВ в Объединенном институте ядерных исследований в Дубне. Диаметр полюсов этого магнита 6 м, масса 7 тыс. т. Несколько уступает ему в размерах синхроциклотрон в Беркли.

Массу магнитов (т) циклотронов можно подсчитать по приближенной формуле  $G = 4,8 \cdot 10^{-3} \cdot r^{2,5}$ , где  $r$  — радиус полюса, см.

Масса обычных магнитов ускорителей составляет несколько тысяч тонн. Магниты циклотронов и, следовательно, сами циклотроны — это громадные и дорогостоящие сооружения. Их обычно размещают в специальных корпусах, огороженных бетонными стенами толщиной несколько метров, которые служат защитой от излучения. Поворотные двери также делают из бетона.

Циклотроны применяют в основном для научных исследований. Однако в последнее время они служат и для получения радиоактивных изотопов, необходимых промышленности и сельскому хозяйству. Сейчас в ряде стран имеется несколько циклотронов, на которых не проводят никаких научных исследований. Эти атомные машины играют роль своеобразного технологического оборудования фабрики, производящей изотопы.

Оказывается, есть предел энергии частиц, ускоряемых в циклотроне. Его диктует теория относительности. Известно, что масса любой частицы в соответствии с теорией относительности возрастает по мере приближения скорости частицы к скорости света. Но частица с большой массой менее "поворотлива": она начинает отставать от частиц с меньшей энергией и запаздывает к ускоряющему промежутку, т.е. попадает туда в тот момент, когда ускоряющее электрическое поле мало или направлено навстречу частице.

По расчетам верхний предел энергии протонов, получаемых в обычном циклотроне, равен 25 МэВ. Чем больше напряженность магнитного поля, тем

больше оборотов делает заряженная частица в единицу времени. Возникает вопрос: нельзя ли сделать так, чтобы от центра к краю полюсов магнитное поле увеличивалось. Тогда приращение массы и, следовательно, "неповоротливость" частицы с ростом ее энергии могли бы быть скомпенсированы, а энергия частиц, получаемых в циклотроне, увеличена.

Но в циклотронах делают наоборот: магнитное поле к краю полюса снижают, осуществляя этим вертикальную фокусировку. Как примирить эти противоположные требования? Как одновременно иметь вертикальную фокусировку и увеличить поле от центра полюса к периферии?

Этой задачей интересовались давно. Еще в 1938г. американский ученый Томас предложил формулу, в соответствии с которой должно изменяться магнитное поле в зазоре циклотрона с тем, чтобы эти два условия обеспечивались одновременно. Однако форма полюса при этом оказалась чересчур сложной. Поэтому идея "изохронного" циклотрона имела в то время немного приверженцев.

Со временем положение изменилось. Инженеры-физики предложили вместо сложных полюсов Томаса использовать обычные цилиндрические полюсы, покрытые стальными накладками простой формы. Как выяснилось, такие накладки обеспечивают одновременное нарастание поля по радиусу и вертикальную фокусировку. Для коррекции поля в зазоре изохронного циклотрона обычно применяют сложную систему концентрических и секторных корректирующих обмоток и накладок.

Изохронные циклотроны позволяют повысить энергию частиц, получаемых на ускорителях этого типа, до 700...800 МэВ. Дальнейшее увеличение энергии — довольно сложная проблема, так как по технологическим причинам трудно точно выдержать все требования к конфигурациям магнитного поля циклотронов столь высоких энергий.

В синхроциклотронах, или фазотронах, установлены аналогичные магнитные системы с тем лишь отличием, что частота ускоряющего напряжения по мере возрастания энергии частиц уменьшается; это позволяет отяжелевшим частицам вовремя проходить ускоряющий промежуток. Такое изменение частоты эквивалентно изменению поля в изохронном циклотроне. Предел энергии частиц, получаемых в синхроциклотронах, также составляет 700...800 МэВ. Магниты циклотронного типа устанавливаются и на микротронах, которые служат для резонансного ускорения электронов в электрическом поле высокой частоты. В магнитах микротронов обычно используется магнитное поле примерно в 10 раз меньшее, чем в циклотронах.

В силу различных причин физического и технического характера (о некоторых из них мы уже говорили) невозможно создать обычные циклотроны с энергией выше 25 МэВ, а изохронные циклотроны и синхроциклотроны — с энергией выше 800 МэВ. Однако имеются еще экономические факторы, ограничивающие создание сверхмощных ускорителей. Подсчитаем, например, массу циклотронического ускорителя на энергию 10 тыс. МэВ или 10 ГэВ. Если магнитное поле на конечной орбите составит 1,45 Тл, то ее радиус должен быть

примерно равным 25 м. Подставив это значение в приведенное ранее выражение для массы магнита

$G = 4,8 \cdot 10^{-3} \cdot r^{2,5}$ , получим, что масса такого магнита составляет 1,5 млн. т. Сама постановка вопроса о построении такого магнита была бы беспредметной.

Почему это происходит? Почему циклотрон на большую энергию имеет такую большую массу? Первая причина, очевидно, заключается в том, что мы выбрали небольшое магнитное поле. Если бы удалось это поле в несколько раз повысить, во столько же раз можно было бы снизить радиус и во столько же в степени два с половиной раз снизить массу магнита. Однако значительно повысить магнитное поле в циклотронах нельзя, так как сталь будет сильно насыщаться.

Другая причина, вызывающая необходимость столь большой массы магнита, объясняется самим принципом работы циклотрона. Поскольку его магнитное поле постоянно во времени, частица, приобретающая в ускоряющем промежутке очередную "порцию" энергии, движется по орбите большого радиуса, и траектория ее движения напоминает спираль. Именно эта спиралевидность орбиты вынуждает иметь в циклотроне полный набор орбит различных радиусов — от нуля до радиуса конечной орбиты.

Однако, видимо, нет неизбежной необходимости иметь в ускорителе полный набор орбит различных радиусов. Если бы магнитное поле в ускорителе с ростом энергии частиц менялось, то согласно формуле  $r = mv/H$  радиус орбиты мог бы оставаться всегда постоянным. Для этого нужно лишь обеспечить закон изменения магнитного поля магнита во времени, приближающийся к закону изменения во времени энергии частиц. В этом случае стало бы возможным вместо цилиндрических полюсов оставить узкое кольцо по краю полюса, а сердцевину полюса убрать вообще. Такие ускорители позволяют при относительно небольшой (по сравнению с гипотетическим циклотроном на ту же энергию) стоимости получать пучки частиц с колоссальными энергиями.

Кольцевые ускорители были главным достижением создателей ускорительной техники после Лоуренса и Векслера. Природа давно оценила преимущества трубчатых конструкций. Распилите кость — она внутри полая. Если бы она не была пустотелой, она была бы тяжелее, но не прочнее. И природа выбрала инженерно правильное и, следовательно, эстетически безупречное решение.

Кольцевой ускоритель — это ускоритель Лоуренса и Векслера, у которого вынута сердцевина полюса магнита и оставлено лишь узкое кольцо. Масса магнита снижается при этом в сотни раз, а ускоритель приобретает правильные, почти архитектурные формы. Красота этого решения — в глубочайшей технологической целесообразности.

Кольцевые ускорители включают синхротроны и синхрофазотроны — самые крупные и дорогостоящие физические приборы, когда-либо находившиеся в распоряжении человека. Диаметр кольцевых магнитов таких ускорителей равен нескольким километрам, магнитная система кольцевых ускорите-

лей обычно состоит из нескольких отдельных секторных магнитов, составляющих в плане кольцо. Между этими секторными магнитами находятся ускоряющие промежутки. Стоимость магнитов синхротронов и синхрофазотронов (между этими двумя типами ускорителей различие невелико) составляет около половины стоимости всего синхротрона.

Как осуществляется вертикальная фокусировка в синхротронах? Принцип тот же, что и в циклотронах: магниты изготавливают так, чтобы магнитное поле на внешнем радиусе было меньше, чем на внутреннем. Тогда каждая частица, вышедшая из срединной плоскости, испытывает со стороны бочкообразного поля силы, заставляющие ее вернуться обратно.

Такую фокусировку называют мягкой. На синхротронах с мягкой фокусировкой можно получить энергию примерно до 15 тыс. МэВ. По-видимому, дубнинский синхрофазотрон был и остается крупнейшей в мире установкой подобного типа (энергия частиц 10 тыс. МэВ, масса магнита 36 тыс. т).

Почему при использовании мягкой фокусировки нельзя достичь больших значений энергии частиц? Дело в том, что с увеличением энергии частиц должен, естественно, расти и радиус ускорителя. Это увеличение радиуса происходит в соответствии с формулой  $E = 300H\mathcal{E}$ , где  $E$  — энергия, эВ;  $H$  — напряженность магнитного поля, Э. Но чем больше радиус, тем больше амплитуда колебаний частицы вокруг своей равновесной орбиты. Сбить частицу с орбиты могут случайные молекулы газа в вакуумной трубке, флуктуации ускоряющего напряжения и частоты. В связи с этим рабочую зону (апертуру пучка) приходится увеличивать, чтобы частица не потерялась в металле магнита во время своего пути, составляющего в ускорителе примерно 0,5 млн. км. Это обходится очень дорого. Так, масса ускорителя на 30 тыс. МэВ с мягкой фокусировкой составила бы 100 тыс. т. Чтобы свести к минимуму всякие колебания частицы вокруг равновесной орбиты и снизить сечение пучка, нужно ввести более жесткую фокусировку, т.е. заставить частицы как можно меньше отходить от своей равновесной орбиты.

Как это сделать, никто до 1951г. не знал. Решение проблемы было выдвинуто группой физиков Брукхейвенской лаборатории в составе Куранта, Ливингстона, Снайдера. Ливингстон как-то предложил рассчитать, как поведет себя частица, ускоряемая в системе из нескольких магнитов, если в каждом следующем магните будет меняться направление, в котором поле снижается. Расчет на электронной машине показал, что частица в этом случае движется по стабильной орбите и, кроме того, подвергается сильным фокусирующим усилиям. В том секторе, где полюсы наклонены внутрь, осуществляются сильная вертикальная фокусировка и горизонтальная дефокусировка; в следующем секторе, где полюсы наклонены наружу, фокусировка обратная. Эффект в целом заключается в том, что при определенном расположении секторов пучок сильно фокусировался, и отклонение частиц от равновесной орбиты было очень небольшим. Действие магнитов равнозначно в этом смысле действию двух линз вогнутой и выпуклой, которые, будучи поставлены одна за другой, дают в целом эффект схождения лучей. Эта идея оказалась очень плодотвор-

ной. На ее основе построены все крупнейшие ускорители. На принципе жесткой фокусировки работает и Серпуховский ускоритель протонов на 76 ГэВ.

В основу постройки крупнейшего в мире ускорителя 60-х годов — Серпуховского — были положены идеи В.И.Векслера.

Пучок протонов, разогнанный в этом исполинском ускорителе, достиг энергии 76 ГэВ (миллиардов электрон-вольт!). Под стать этой грандиозной энергии и сам ускоритель.

Новый синхротрон стал базой нового физического института, размещенного в Серпухове, — Института физики высоких энергий (ИФВЭ). Здесь были получены важнейшие научные результаты: открыт новый в физике высоких энергий тип симметрии — масштабная инвариантность, положенная теперь в основу теории сильных взаимодействий на малых расстояниях с участием кварков — так называемой квантовой хромодинамики.

В Серпухове открыт и новый физический эффект сложной природы, описывающий поведение сталкивающихся частиц, — "серпуховский эффект".

Ученые США не остались в долгу и начали строить свой, еще более мощный ускоритель. В этом, может быть, сыграл свою роль "эффект подстегивания", о котором остроумно рассказывал академик Л.А.Арцимович:

"Делегация ученых великой державы А, возвращаясь после поездки в великую державу Б, докладывает:

- По богатству идей, глубине понимания научных проблем и квалификации научных кадров мы не только не уступаем нашим зарубежным коллегам, но даже стоим впереди них. Однако там не пожалели денег, и они смогли построить новую замечательную установку X, и если мы немедленно не начнем строить уже давно задуманную нами установку Y, то почти сразу же окажемся в жалком и отчаянном положении.

Вслед за этим делегация державы Б возвращается из державы А и декларирует:

- Мы, конечно, в идейном отношении гораздо выше их, но нельзя ждать ни одного часа более. Они уже приступают к строительству установки Y, и если мы прозеваем, то через несколько лет нам стыдно будет показаться на любой научной конференции. Поэтому надо немедленно строить установку, которая во столько же раз мощнее установки Y, во сколько последняя превосходит нашу старую машину X. И так далее..."

Для создания жесткой фокусировки в серпуховском и подобных ему ускорителях поставлены друг за другом секции магнитов с разным направлением спада поля; если в первом магните поле спадает по направлению к внешнему радиусу (вертикальная фокусировка), то в следующем магните оно спадает к центру, уменьшая сечение пучка в горизонтальном направлении. В результате сечение пучка и, следовательно, размеры рабочей зоны магнита становятся меньше, что позволяет увеличить энергию частиц без существенного утяжеления магнита.

Принцип жесткой фокусировки стал широко применяться не только в ускорителях. Например, для фокусировки пучка и подачи его к столу экспери-



ментатора широко используются поворотные магниты и квадрупольные линзы, работающие на этом принципе.

Создание ускорителей с жесткой фокусировкой позволит увеличить энергию получаемых частиц при снижении массы магнитной системы. Однако и в этом случае строительство синхротрона будет под силу лишь экономически мощным государствам. Решение вопроса о строительстве такой машины возможно только в государственном масштабе, как, например, вопрос о строительстве нового города. Сравнение с городом здесь не случайно — рядом с ускорителем неминуемо вырастет научный центр с целым городом ученых, технического персонала и т.п.

Один из таких новых городов вырос недавно в Батавии, в США. Там построен крупнейший в мире ускоритель на 500 ГэВ.

Неудивительно, что идея нового ускорителя родилась в Радиационной лаборатории имени Лоуренса, где был построен и первый циклотрон, и "Беватрон" 1954г. Предварительный эскизный проект синхротрона на 200 ГэВ был разработан инженерами-физиками в Беркли еще в 60-годах, когда определялось направление следующего этапа работ США в области физики высоких энергий. Несмотря на успехи ускорительной техники, обнадеживающие результаты экспериментов на крупных ускорителях, ряд коренных вопросов строения материи продолжает волновать неутоленное воображение ученых. Все эти вопросы "прекрасного, но все еще загадочного мира", возможно, могли бы быть решены в процессе экспериментов с соударениями частиц, еще более энергичных, чем те, которые получают с помощью наиболее мощных синхротронов, включая даже Серпуховский. Кроме того, путешествие в мир столь экзотических энергий могло бы привести к весьма неожиданным открытиям. Настойчивость физиков привела к тому, что конгресс США одобрил в 1967г. ассигнования в 250 млн. дол. на постройку "малого варианта" нового ускорителя ("большой вариант" стоил бы 350 млн. дол.). Из 125 мест, предложенных для постройки ускорителя, была выбрана плоская местность Кун-Холлоу вблизи Батавии в штате Иллинойс площадью 10 квадратных миль. Для постройки и эксплуатации будущего ускорителя была создана Исследовательская ассоциация университетов. Так возникла база для будущей Национальной ускорительной лаборатории США, директором которой был назначен Роберт Вильсон. Это он впоследствии рассказывал о драматических событиях постройки уникального ускорителя.

Получив 250 млн. дол., Вильсон и его новые сотрудники решили сделать ускоритель не на 200 ГэВ, как было запланировано, а сразу на 500 ГэВ. Отважные участники встречи 15 июня 1967г. на месте постройки будущей машины решили построить ускоритель всего за пять лет (в этот день они не знали хотя бы приблизительно даже диаметра будущего ускорителя).

Вообще говоря, диаметр ускорителя для получения большей энергии целесообразно было делать возможно большим, и поэтому его, казалось, должен был бы определить размер заданного участка. Однако стоимость ускорителя тем больше, чем больше диаметр магнитов, а она ограничена сверху ассигно-

ванной суммой. Если задаться желаемой энергией частиц, то диаметр будет определяться уже тем максимальным магнитным полем, которое удастся обеспечить, и расстояниями между поворачивающимися магнитами.

Был выбран диаметр, равный ровно 2 км. Часть окружности, примерно четверть ее, должна была быть освобождена для устройства ввода и вывода протонного пучка, ускоряющих и измерительных устройств. Тогда при магнитном поле 1,8 Тл можно было бы достичь энергии 400 ГэВ, а при магнитном поле 2,25 Тл — 500 ГэВ.

Такое магнитное поле и даже значительно большее в принципе можно было бы довольно легко получить при помощи сверхпроводящих магнитов. Однако проектировщики решили не рисковать и остановились на хорошо освоенных электромагнитах со стальным сердечником.

Важным параметром магнитов, определяющим их стоимость, является, как мы видели, апертура, рабочее пространство между полюсами магнита. Чем больше апертура, тем легче предотвратить рассеяние протонов на стенках камеры из-за их взаимного электростатического отталкивания и неточного "прицеливания". Большая апертура, однако, — это серьезное возрастание затрат на материалы сердечника и обмоток, на земляные работы (туннель становится шире и выше), на радиационную защиту и электроэнергию, затрачиваемую в обмотках. Точно рассчитать увеличение надежности работы ускорителя за счет увеличения апертуры вряд ли возможно, и проектировщики остановились на значении, подсказанном опытом и интуицией. Для примененной системы жесткой фокусировки был выбран зазор между полюсами 5 см и ширина полюсов 10 см на одной стороне магнитов и соответственно 3,8 и 12,5 см — на другой. Интересно обратить внимание на очевидную "нерасчетность" этих цифр (особенно если перевести их в дюймы), так же как и на случайный размер диаметра (2 км).

В результате расчетов, проведенных на основе учета приведенных данных, длина каждого из 660 поворачивающихся магнитов (каждый массой 11 кг) оказалась равной 6,5 м, высота 30 см и ширина около 80 см. 180 фокусирующих магнитов имеют длину 2,3 м, весят каждый по 5 т. Функции поворота и фокусировки здесь, как мы видим, разделены.

Крайне упрощена была система питания магнита. Вместо надежной, но дорогостоящей системы мотор-генераторов, дающей постоянный ток, здесь была установлена система мощных селеновых выпрямителей для выпрямления обычного трехфазного тока из сети. Крайне упрощен и фундамент — он не имеет бетонных опор, покоящихся на скальном основании. Возможные в этом случае перекосы магнитов снимаются специальными юстировочными устройствами. Сам туннель составлен из стандартных бетонных секций, установленных на не очень мощном бетонном монолите.

И все же вся эта затея была, по выражению ее авторов, "бравадой". Некоторая доля риска и самонадеянности была социально обусловлена — нужно было привлечь к делу нужных людей. То, что эта идея в конце концов осуществлена и крупнейший в мире ускоритель заработал, — результат соче-

тания интуиции, осторожной смелости и упорства физиков и инженеров, случайного благополучного стечения обстоятельств и крайне удачного "поворота дела" в правительстве США, неожиданно для самих создателей ускорителя отпустившем им огромную сумму денег. Построенный ускоритель успешно работает. Исследователи планируют сделать его еще мощнее, заменив обычные магниты более сильными, сверхпроводниковыми.

Ускорители — удовольствие дорогое. Например, ускоритель на 1000 ГэВ будет стоить около 1 млрд. руб., диаметр его секционированного кольцевого магнита составит около 7 км. На строительстве такого ускорителя будут заняты тысячи человек и сотни организаций. Правда, масса магнита при введении жесткой фокусировки для такой энергии частиц весьма умеренна — "всего" 30 тыс. т. Для защиты от излучения придется построить вокруг ускорителя бетонные стены толщиной 12 м.

Возрастание энергии до столь высоких значений приводит к новым трудностям, касающимся фокусировки. Ведь диаметр ускорителя на 1000 ГэВ около 7 км, а для того, чтобы частица не уклонялась от равновесной орбиты и не терялась бы в полюсах магнита, необходимо устанавливать магнит с погрешностью до 0,01 мм. Магнитные системы этих гигантских ускорителей действуют по кибернетическому принципу. Любая погрешность в изменении направления пучка тотчас же фиксируется приборами, и в ускоряющую систему из вычислительного центра подается команда об изменении ее параметров, которая должна перевести пучок-нарушитель на свою орбиту.

А может быть, физики найдут какое-нибудь более изящное решение, которое позволит достичь новых колоссальных энергий путем сравнительно небольших затрат?

Относительно недавно были предложены совершенно новые идеи создания сверхмощных ускорителей. Одна из них заключается в том, что ядро и цель — частица и мишень — "выстреливаются" навстречу друг другу с помощью сравнительно небольших ускорителей и сталкиваются с громадной, невиданной ранее силой.

В числе лауреатов Ленинской премии 1967г. были физики из Новосибирска Г.И.Будкер, А.А.Наумов, А.Н.Скринский, В.А.Сидоров, В.С.Панасюк. Им первым удалось осуществить на практике идею встречных электрон-позитронных пучков. В установке ВЭПП-2, магниты которой имеют диаметр всего лишь 3 м, новосибирским физикам удалось достичь энергии взаимодействия частиц, равной 2 млн. МэВ! Обычный линейный ускоритель на ту же энергию уместился бы не во всяком европейском государстве.

Идея ускорителя без магнитов принадлежит Энрико Ферми, который, конечно, имел в виду обойтись именно без магнитов, но не без магнитного поля, иначе ускоритель получился бы колоссальной длины. Вместо поля магнитов Ферми предложил использовать магнитное поле Земли. Ускоритель типа синхротрона должен был бы представлять собой вакуумную трубу, опоясывающую земной шар вдоль магнитного экватора. Осуществление такого проекта могло бы дать пучки чрезвычайно энергичных частиц, однако стоимость

ускорителя, по-видимому, оказалась бы громадной — ведь орбита частиц должна быть круговой, а Земля — далеко не идеальный шар. Чтобы обеспечить идеальную окружность, пришлось бы прорывать туннели, строить виадуки над океанами и т.д. А проблема обеспечения герметичности и высокого вакуума устройства, опоясывающего земной шар!

Какую же энергию частиц можно получить с помощью ускорителей? Естественно, что самый большой возможный на нашей планете ускоритель должен располагаться по экватору Земли. Индукция магнитного поля определяемая насыщением стали, равна, скажем, 2 Тл. При этих условиях максимальная энергия ускоряемых протонов будет равна  $10^{10}$  МэВ.

Космической эре свойственны и космические проекты. Таким является проект "лунатрона". Ускоритель можно разместить на нескольких спутниках, вращающихся вокруг Земли. На спутниках можно установить фокусирующие магниты, ускоряющие пластины, инжекторы. С помощью такой системы можно будет достичь энергии порядка  $10^8$  МэВ. Большое преимущество такой системы — отсутствие необходимости вакуумировать рабочее пространство — ведь лунатрон будет размещен вне атмосферы (т.е. в условиях естественного высокого вакуума).

Чрезвычайно интересная идея ускорителя предложена советским физиком академиком Г.И.Будкером. Она заключается в том, чтобы слабым наводящим полем создавать мощный круговой пучок электронов. Этот пучок стал бы, по сути дела, гибким шнуром, по которому течет очень сильный электрический ток. Электрический ток всегда создает магнитное поле, стремящееся уменьшить сечение проводника (пинч-эффект). Однако, чем меньше диаметр шнура, тем больше при том же токе магнитное поле, создаваемое на поверхности шнура. Г.И.Будкер предложил использовать это очень сильное магнитное поле как рабочее поле ускорителя. В пучке электронов диаметром 6 м можно удерживать протоны с энергией вплоть до  $10^4$  МэВ.

Большие надежды возлагают физики и на сверхпроводимость. Ограничителем магнитного поля ускорителей является индукция насыщения стали (около 2 Тл). Однако, если сталь из ускорителя убрать, возникнет много других проблем. Сопротивление магнитному полю ускорителя, например, сразу увеличится. Чтобы сохранить поток прежним, нужно сильно увеличить мощность питания обмоток, которая и при ускорителе со сталью была огромной. Мощность питания американского синхрофазотрона "Беватрон" составляла 100 тыс. кВт. Такую мощность потребляет город со стотысячным населением.

При рассмотрении проекта ускорителя "Газовая и электрическая компания" тихоокеанского побережья специально занималась вопросом: не будут ли "садиться" все лампы в городах Беркли и Окленде, когда в ускорителе разогнается пучок протонов.

А ведь "Беватрон" — относительно небольшой ускоритель и к тому же со стальным сердечником. В ускорителях на 300 тыс. — 1 млн. МэВ без стали потребление электроэнергии будет гораздо больше. Соответственно более дорогостоящим и громоздким окажется сам ускоритель. Но если разобраться,

эта колоссальная энергия будет в большей мере тратиться попусту. Для поддержания магнитного поля не требуется энергия: постоянный магнит ниоткуда не получает энергию, а его магнитное поле не расходуется, когда им что-либо притягиваешь. Энергия необходима лишь на установление поля: если в этой области пространства магнитного поля раньше не было, а теперь оно есть — это значит, что затрачена некоторая энергия. Остальная электроэнергия тратится на нагревание обмоток, обладающих электрическим сопротивлением. Не будь сопротивления, потери бы исчезли. Если подсчитать, какая часть энергии в ускорителях используется полезно, то окажется, что она ничтожна.

Именно с этим обстоятельством и связаны попытки использовать в качестве материала обмоток магнитов ускорителей сверхпроводник. У сверхпроводника омическое сопротивление отсутствует и, следовательно, потери энергии также отсутствуют. Другая положительная сторона применения сверхпроводящих обмоток — возможность сильного увеличения магнитного поля, а стало быть, и уменьшения радиуса ускорителя. Если удастся достичь магнитного поля 10 Тл, размеры ускорителей уменьшатся впятеро.

В поисках новых путей, позволяющих более дешевым и эффективным способом получать частицы высоких энергий, ученые ФИАНа выдвинули идею построить в Протвино ускорительно-накопительный комплекс (УНК) на энергию ускоряемых протонов 3000 ГэВ. Большой вклад в развитие и осуществление этой идеи внес академик А.А.Логунов. Частицы энергий 70 ГэВ, ускоряемые на уже существующем Серпуховском ускорителе, будут "впрыскиваться" в УНК для дальнейшего ускорения. В УНК будут использоваться мощные сверхпроводящие магниты, которые позволят снизить длину окружности ускорителя с 60 до 20 км, резко уменьшить энергозатраты на питание магнитов. Несмотря на гигантские финансовые расходы, комплекс решено строить, и строительство начато. Ученые предполагают, что уникальный физический прибор поможет раскрыть самые сокровенные тайны строения вещества. Новый ускоритель будет стоить около миллиарда рублей, диаметр его секционного кольцевого магнита - - около 7 км, а займется строительством его несколько тысяч человек и сотни организаций. Защищаться от излучения такого ускорителя придется бетонными стенами двенадцатиметровой толщины.

Строительство новых сверхмощных ускорителей вызовет определенное напряжение даже для таких стран, как СССР и США. Это напряжение будет не только финансовым, но и "умственным". С новым ускорителем так или иначе свяжут свой труд около 200 кандидатов и докторов наук — целая армия ученых. Поэтому в европейской печати довольно часто начинает проскальзывать мысль о том, что ускорители на такие большие энергии следует строить "всем миром" — т.е. в буквальном смысле силами всех развитых стран.

Еще в 1963г., когда В.И.Векслер получал международную премию "Атом для мира", он призвал к международному сотрудничеству ученых в деле постройки сверхмощных ускорителей: "Природа одна; проблемы, которые она представляет нам на данном этапе развития науки, очень часто имеют единст-

венное решение, конечно, не зависящее от того, где живут - в Советском Союзе или в Соединенных Штатах — люди, стремящиеся найти это решение".

Неизвестно, как в конце концов разрешится эта проблема -- будут ли такие ускорители строить отдельные государства или группы государств, или, наконец, проблема попадет в ранг вопросов, решаемых ООН. А пока энергия ускорителей десятикратно увеличивается каждые шесть лет. Что же будет дальше?

## **Плазма в магнитной рубашке**

Среди технологических революций конца XX века одной из самых главных является перевод потребителей на атомное топливо. И снова магнитные поля оказались в центре внимания. Только они смогут обуздать своенравную плазму в "мирной" термоядерной реакции, которая должна прийти на смену реакциям деления радиоактивных ядер урана и тория.

Что бы еще сжечь? — навязчивым рефреном звучит вопрос, вечно мучающий энергетиков. Довольно долго нас выручали дрова, но у них малая энергоемкость, а потому дровяная цивилизация примитивна. Сегодняшнее наше благосостояние основано на сжигании ископаемого топлива, однако легкодоступные запасы нефти, угля и природного газа медленно, но верно иссякают.

Волей-неволей приходится переориентировать топливно-энергетический баланс страны на что-то другое. В будущем веке остатки органического топлива придется сохранять для сырьевых нужд химии. А основным энергосырьем, как известно, станет ядерное топливо.

Ядерная энергия много лучше энергии химической вследствие высокой концентрации на единицу массы топлива. Уран, один из самых дорогих металлов, стал самым дешевым топливом, ибо по производству тепла 1 г его эквивалентен 3 т антрацита. Даже переход на все более трудноразрабатываемые месторождения, что со временем неизбежно, атомная энергетика в состоянии перенести безболезненно. Хотя уран подорожает, стоимость топлива скажется только на пятой части затрат, нужных для производства электроэнергии на АЭС.

Весьма привлекательные перспективы связаны не с делением ядер, а с их синтезом. Если сольются два легких ядра, то при этом выделится гораздо больше энергии, чем при делении тяжелого ядра. Энергоресурсы для синтеза ядер много доступнее: из дейтерия, содержащегося в 1 л воды, можно получить столько же энергии, сколько из 350 л бензина, так что четыре земных океана равноценны 1400 океанам бензиновым! Даже при стократном росте потребления этих запасов хватит на миллиарды лет.

Технология ядерного синтеза несложна. Ядра дейтерия и трития — изотопов водорода, составлены из протона плюс один или два нейтрона. Если эти ядра сольются, то возникнут новое летящее ядро гелия (оно несет пятую часть энергии синтеза) и осколок — свободный нейтрон (четыре пятых энергии). Отобрать энергию реакции можно нагревом воды.

Чтобы воплотить в жизнь эту очередность действий, нужно сначала решить простую задачу: как сблизить ядра, ведь они расталкиваются электрическими силами? Выяснилось, что подвести ядра вплотную друг к другу можно тремя способами.

Инерцией, например. Если ядро-снаряд сильно разогнать, то при большой скорости оно проскочит в мертвую зону около ядра-мишени, где ядерное притяжение уже в сотни раз сильнее электрического отталкивания. А разогнать ядро можно на ускорителе (это пока экономически невыгодно) или нагревом газа (потому и называется синтез термоядерным).

Второй способ сближения — сжать смесь нужных атомов какими-то сторонними силами, очистив ядра от электронной "скорлупы". Этот способ оказался вполне приемлемым. И еще одно предложение: погасить расталкивание особым ядерным "клеем" из мюонов — элементарных частиц.

Еще в середине века ученые отважно взялись за решение проблемы "термояда", хотя кое-что оставалось неизвестным. Какова же природа ядерных сил? Почему они в миллионы раз интенсивнее химических сил? Отчего эти силы действуют только вблизи ядер, зависят от их ориентации и скорости, а вне ядра быстро исчезают?

За последние тридцать лет появились (но пока только в лабораторном исполнении или только в мыслях, уже подкрепленных расчетами и опытами) три класса гипотетических конструкций ядерных реакторов синтеза будущего.

Весьма перспективными оказались лазерные реакторы. Под руководством академика Н.Г.Басова в Физическом институте АН СССР уже построены гигантские модели, напоминающие сказочных спрутов. Стекланные шарики с газовой начинкой расстреливаются сотнями лазерных вспышек, с разных сторон согласованно бьющих в одну цель. Горящие мишени сжимаются расширяющимся газом, плазма начинает рассеиваться, но за миллиардные доли секунды часть ядер успевает слиться. Пока что показатели таких пушек почти рекордны: температура плазмы уже достигла нужных 100 млн. градусов, но плотность ее надо поднять еще раз в пятьдесят.

Самое заслуженное и, видимо, наиболее перспективное направление работ, родившееся в Институте атомной энергии имени И.В.Курчатова, — токамаки. (Это название образовано из слов ТОк, КАмера, МАгнитные КАтушки. Другая расшифровка: Тороидальная КАмера с АКсиальным магнитным полем.) В тороидальной камере газ греется, а плазму от соприкосновения со стенками удерживают огромные магнитные поля. На токамаках удалось нагреть плазму до 250 млн. градусов, но плотность или время удержания ее надо бы увеличить раз в десять.

Какой сосуд выдержит такую высокую температуру? Прикоснувшись к стенкам сосуда, плазма либо охладится до такой температуры, при которой реакция станет невозможной, либо испарит стенку, как испарила стальную башню и песок при термоядерном взрыве на атолле Бикини. Никакой материал не может выдержать таких высоких температур, и поэтому в 50-х годах вопрос: "В чем держать плазму?" привлек внимание ученых всего мира.

Физики Советского Союза, США и Великобритании, являвшиеся в то время "атомной тройкой", разъединенные непроницаемым барьером секретности, примерно в одно время начали работать над этой проблемой. После выступления И.В.Курчатова в Харуэлле в 1956г., где он неожиданно для английских и американских физиков "раскрыл карты" и рассказал о самых "секретных" термоядерных исследованиях, барьер секретности был снят. Выяснилось, что физики трех разных стран пришли к одному выводу: единственная возможность удержать плазму и не дать ей охладиться — использовать магнитное поле. Невидимое, неосязаемое, оно прочной сетью силовых линий будет держать плазму вдали от стенок любого сосуда, которые она могла бы испепелить. Выяснилось также, что физики СССР, США и Англии не только разработали однотипные установки, но и получили на них примерно одинаковые параметры плазмы. Более того, жаргонные названия установок также оказались одинаковыми!

Идея магнитной термоизоляции плазмы основана на известном свойстве электрически заряженных частиц, движущихся в магнитном поле, искривлять свою траекторию и двигаться по спирали силовых линий поля. Это искривление траектории в неоднородном магнитном поле приводит к тому, что частица выталкивается в область, где магнитное поле более слабое. Задача состоит в том, чтобы плазму со всех сторон окружить более сильным полем. Эта задача решается во многих лабораториях мира.

Магнитное удержание плазмы открыли советские ученые, которые в 1950г. предложили удерживать плазму в так называемых магнитных ловушках (или, как часто их называют, в магнитных бутылках).

Примером весьма простой системы для магнитного удержания плазмы может служить ловушка с магнитными пробками или зеркалами (пробкотрон). Система представляет собой длинную трубу, в которой создано продольное магнитное поле. На концах трубы намотаны более массивные обмотки, чем в середине. Это приводит к тому, что магнитные силовые линии на концах трубы расположены гуще и магнитное поле в этих областях сильнее. Таким образом, частица, попавшая в магнитную бутылку, не может покинуть систему, ибо ей пришлось бы пересекать силовые линии и вследствие лоренцевой силы "накручиваться" на них. На этом принципе была построена огромная магнитная ловушка установки "Огра-1", пущенной в Институте атомной энергии имени И.В.Курчатова в 1958г. Вакуумная камера "Огра-1" имеет длину 19 м при внутреннем диаметре 1,4 м. Средний диаметр обмотки, создающей магнитное поле, составляет 1,8 м, напряженность поля в середине камеры 0,5 Тл, в пробках 0,8 Тл.

Но, как выяснилось, магнитная система указанного типа в ее "чистом" виде обладает серьезными недостатками. В этой системе самое слабое магнитное поле получается в середине канала у стенок. Сюда и устремляется плазма при разряде и уже менее чем через 0,001 с оказывается на стенках камеры.

Новый шаг по усовершенствованию "бутылок" был сделан в 1963г., когда в Институте атомной энергии имени И.В.Курчатова была пущена установка



ПР-5. Идея этой установки предложена Б.Б.Кадомцевым, который исследовал причины неудач с чистыми пробкотронами. Он установил, что для более успешного удержания плазмы необходимо усложнить конфигурацию магнитного поля, и предложил в дополнение к системе магнитных пробок вдоль образующих активного цилиндра сделать еще одну обмотку таким образом, чтобы по соседним проводникам ток шел в противоположных направлениях. Это должно было привести к тому, что вблизи стенок цилиндра создавалось бы дополнительное магнитное поле, препятствующее приближению плазмы к стенкам.

При наложении поля прямолинейных проводников на "бутылочное поле" получается весьма замысловатая картина.

Установка была построена советскими физиками — сотрудниками Института атомной энергии имени И.В.Курчатова, работавшими под руководством М.С.Иоффе. Прямолинейные проводники были расположены под катушками, создающими магнитное поле пробок. Индукция продольного магнитного поля в центре камеры составляла 0,8 Тл, в области пробок 1,3 Тл, индукция магнитного поля прямолинейных проводников вблизи стенок была равной 0,8 Тл, длина рабочего объема 1,5 м, диаметр 40 см.

Первые же эксперименты окрылили физиков. Устойчивость плазмы возросла в 35 раз по сравнению с устойчивостью, имевшей место на чистых пробкотронах, и плазма жила в течение нескольких сотых долей секунды.

В 1964г. вступила в строй установка "Огра-11", в которой также использован принцип комбинированных магнитных полей.

Усложнение конфигурации магнитного поля - ключ к долгоживущей плазме. Созданы магнитные системы со встречными полями (установка "Орех"), антипробкотроны и другие весьма изощренные установки.

Можно попытаться преодолеть "ускользание" частиц из рабочей зоны через "горлышки" магнитных бутылок типа пробкотрон еще одним остроумным способом: сделать рабочую зону не цилиндрической, а тороидальной. В этом случае частица, ускользящая из пробкотрона через горлышко, опять оказывается в рабочей зоне! Эта идея, оказавшаяся очень жизнеспособной, и была использована во множестве модификаций. Что будет, например, если создать в тороидальной камере продольное магнитное поле? Любая заряженная частица, попавшая в камеру, должна была бы двигаться так, чтобы ее траектория "навивалась" на магнитные силовые линии. Однако вскоре сами авторы нашли в своей системе серьезный дефект. Оказалось, что в тороидальной камере, где магнитные силовые линии искривлены, индукция магнитного поля (густота силовых линий) у внутренней стенки трубы выше, чем у наружной. Это объясняется упругостью силовых линий, стремлением их как можно больше сократиться. В результате у внутренней стенки, где путь короче, скапливается больше силовых линий, чем у наружной.

Эта неоднородность магнитного поля изменяет спиральный характер орбит частиц. Вблизи внутренней поверхности замкнутой на себя трубы - тора, где поле больше, частицы должны были бы двигаться по орбите с мень-

шим радиусом, чем около внешней поверхности. В результате этого заряженные частицы "дрейфуют" поперек силовых линий магнитного поля, причем положительно заряженные ядра налетают на "потолок" трубы, а электроны — на ее "дно". Этот дрейф частиц — вещь довольно неприятная сама по себе, но косвенный эффект дрейфа просто катастрофичен. Разделение зарядов по знаку вызывает возникновение в пространстве камеры непредусмотренного электрического поля, которое совершенно искажает орбиты частиц, бросая их на стенки камеры.

Как избежать неоднородности магнитного поля? Как сделать так, чтобы силовые линии в тороидальной камере были равной длины?

Этого можно добиться в том случае, если заставить силовую линию, которая идет вдоль внутренней поверхности камеры, на каком-то участке поменяться местами с силовой линией, идущей около внешней поверхности. Тогда длина всех силовых линий была бы одинаковой, и все силовые линии оказались бы в равных условиях: каждая силовая линия, сделав виток по поверхности тора, не попадала бы в прежнюю точку, а образовывала бы поверхность, называемую магнитной поверхностью.

Такого эффекта можно было бы достичь, изгибая силовые линии вокруг оси тора. В этом случае силовые линии имели бы примерно такую же форму, как отдельные нити крученой веревки. Во вращательно-преобразованном магнитном поле дрейф частиц свелся бы к минимуму.

Частицы, быстро движущиеся вдоль силовых линий и таким образом все время огибающие ось камеры, не могут упасть на нижнюю или верхнюю стенку. Когда частица, дрейфующая вверх, находится ниже оси, она, естественно, стремится отодвинуться от нее; когда же частица находится внизу, тот же самый дрейф вверх компенсирует прежнее смещение, подвигая ее к оси. В результате среднее расстояние частицы от оси остается неизменным. Подобная система использована в стеллараторе, построенном в США. Его камера в плане имеет вид гаревой дорожки стадиона. Внутренний радиус камеры 20 см, длина по оси 12 м, индукция магнитного поля около 5 Тл. Мощность питающей электроустановки 15 тыс. кВт.

Остроумный способ "вращательного преобразования" или "свисания" магнитных силовых линий был предложен американским физиком Л.Спитццем и советским физиком академиком Л.А.Арцимовичем.

Мы уже говорили о том, что обычное "нескрученное" продольное магнитное поле обладает неоднородностью, приводящей к тому, что отрицательные частицы врезаются в "пол", а положительные — в "потолок" камеры. А что, если, оставив одну половину тора неизменной, перепутать "пол" и "потолок" в другой половине или, короче говоря, превратить тор-бублик в восьмерку? Тогда, начав падать в одной половине бывшего тора, частица должна будет "падать вверх" на другой его половине и, таким образом, в среднем останется на одном расстоянии от оси камеры.

Если оценить тороидальные камеры типа стелларатора с винтовой обмоткой, преобразованные в восьмерку, то можно сделать вывод о том, что стелла-

раторы — это весьма совершенные магнитные системы для удержания плазмы. Их недостаток — трудность изготовления и дороговизна.

А нельзя ли для удержания плазмы в магнитном поле использовать магнитное поле самой плазмы? Если в плазме есть какое-то упорядоченное движение заряженных частиц в одну сторону, то это означает, что плазма представляет собой гибкий шнур с электрическим током, так как, по определению, электрический ток — это и есть упорядоченное движение заряженных частиц.

Ток создает вокруг себя магнитное поле, силовые линии которого опоясывают провод, по которому этот ток проходит. Одним из важных свойств силовых линий является их стремление идти по кратчайшему пути, их упругость, максвелловское натяжение, приводящее к тому, что силовые линии стремятся сжать опоясываемый ими проводник с током. В случае обычных медных проводов упругость силовых линий не может привести к уменьшению диаметра проводов, поскольку кристаллическую решетку твердых тел деформировать довольно трудно. Если ток течет по плазменному шнуру, то упругость силовых линий, охватывающих этот шнур, приводит к тому, что шнур уменьшается в сечении и отходит от стенок камеры. Это явление, получившее название пинч-эффекта, казалось бы, полностью решает задачу магнитной термоизоляции плазмы: стоит "организовать" в плазме ток, как она сама отойдет от его стенок и сожмется в тонкий шнур в середине сосуда.

Однако здесь начинает действовать свойство заряженных частиц (и, следовательно, плазмы в целом) выталкиваться в область с более слабым полем, туда, где меньше силовых линий, где они расположены не так густо. Это свойство приводит к тому, что малейший изгиб или местное сужение плазменного шнура в конце концов приводит к аварийному процессу. Пусть, например, в силу каких-либо случайных обстоятельств в шнуре образовался небольшой изгиб. Тогда на выпуклой части изогнутого шнура силовые линии магнитного поля становятся более редкими, а на вогнутой — более густыми. Плазменный шнур начинает выталкиваться из той области, где силовые линии расположены гуще, наружу, к стенкам сосуда, изгиб плазменного шнура увеличивается, и плазма в конце концов попадает на стенки камеры. Это происходит так же, как в сжатой длинной пружине, которая, как известно, неустойчива к поперечным деформациям. Точно таким же образом местное сужение плазменного шнура приводит к еще большему его сужению, а затем — к разрыву.

Бороться с этими явлениями можно при помощи магнитного поля. Если вдоль плазменного шнура проходят силовые линии магнитного поля, создаваемого каким-то посторонним источником, то упругость этих линий приведет к тому, что любой изгиб, случайно возникший у шнура, будет ликвидирован так же, как и случайное сужение шнура. Примерно то же самое произойдет, если внутри сжатой пружины пропустить растянутые упругие жгуты.

Чтобы возвращение плазмы в устойчивое состояние проходило более эффективно, необходимо создать в ней очень сильное продольное магнитное поле.

Другим действенным способом преодоления изгибов плазменного шнура, особенно изгибов с большим радиусом, может быть использование более или менее массивного металлического кожуха, сосуда, в котором содержится плазма. Между кожухом и плазменным шнуром проходит какой-то магнитный поток, т.е. существует магнитное поле с его условными силовыми линиями. Если плазменный шнур сместится со своего прежнего положения, магнитное поле между ним и кожухом исказится, деформируется. В одном месте силовые линии будут сдавлены, в другом — растянуты. Если опять учесть присущее магнитным силовым линиям свойство упругости, то станет ясно, что они постараются вернуть плазменный шнур в прежнее положение вдоль оси камеры.

Стабилизация плазмы продольным полем становится особенно эффективной, когда удается сделать так, чтобы продольное поле существовало лишь в плазме, а вне ее, т.е. в пространстве между стенками камеры и шнуром, отсутствовало. Это можно осуществить в том случае, когда сжимающийся при прохождении сильного тока плазменный шнур увлекает за собой все силовые линии продольного поля, созданного в полном объеме камеры. Отрываясь от стенок камеры, плазменный шнур увлекает за собой все магнитные силовые линии, ранее существовавшие в камере, создавая между стенками камеры и шнуром магнитный вакуум в отношении продольного поля.

Все эти идеи начали практически воплощаться уже в 50-х годах. Первые установки представляли собой стеклянные, фарфоровые или кварцевые тороидальные камеры (впоследствии камеры чаще всего стали делать из тонкой нержавеющей немагнитной стали), внутри которых размещали рабочие камеры с медными толстыми стенками, иногда называемыми лайнерами. На камеру наматывали обмотку, создававшую продольное стабилизирующее магнитное поле до 0,05 Тл. Внутренняя тороидальная камера заполнялась газом. Этот кольцевой газовый виток служил вторичной обмоткой трансформатора. Роль первичной обмотки, питающейся от мощной конденсаторной батареи, выполнял внешний металлический кожух камеры. Для снижения магнитного сопротивления использовали железный сердечник. Иногда в качестве первичной обмотки применяли обычную медную.

В одной из первых установок трансформатор состоял из двух отдельных сердечников, имевших круглые внутренние отверстия для размещения разрядной камеры. Сердечники с внутренним диаметром 1,5 м и внешним диаметром 3 м были намотаны ленточной трансформаторной сталью.

Если на первичную обмотку такого трансформатора дать мощный импульс тока от конденсаторной батареи, то во вторичном газовом витке также возникнет электрический ток. Этот ток проходит по газу, разогревает его до высокой температуры, превращая в плазму. Плазменный шнур под влиянием тока сжимается и отрывается от стенок.

Сходные конструкции имели и другие первые американские экспериментальные установки: "Спектр", "Альфа" и "Пихэпетрон". На них были проведены многочисленные эксперименты, результаты которых, однако, не оправдали

надежд. Выяснилось, что стабилизирующее продольное поле, вопреки первоначальным прогнозам, было мало для того, чтобы сделать плазменный шнур устойчивым к разного рода случайным возмущениям. Продольное магнитное поле по отношению к собственному полю плазмы было слишком мало. Упругие жгуты внутри пружины оказались слабыми для удержания ее от аварийных изгибов.

Чтобы обойти эту трудность, необходимо было резко увеличить продольное поле и ослабить собственное поле шнура. Эта задача была решена советскими учеными на установках типа токамак. Для создания сильного продольного поля в системе использованы мощные соленоиды, которые приходилось питать от мощных импульсных генераторов, используемых обычно для возбуждения синхротронов. Хотя магнитное поле, создаваемое такими системами, импульсное (продолжительность импульса примерно 0,2 с), оно в сотни раз превосходит по длительности время разряда и для него является практически постоянным. Магнитное поле установок типа токамак достигает 3,5... 5 Тл, т.е. в сотни раз превышает поле установок типа "Альфа".

А как не допустить уменьшения радиуса шнура при линч-эффекте? Ведь при уменьшении радиуса возрастает собственное поле шнура, и те преимущества, которые достигнуты применением мощного продольного поля, сводятся к нулю. Однако если поле шнура мало, то шнур останется слишком широким. Он будет касаться стенок камеры и охлаждаться. Для преодоления этого явления конструкторы установок типа токамак решили применить в тороидальной камере диафрагмы с небольшими по сравнению с диаметром камеры отверстиями. Эксперименты показали, что эта конструкция обеспечивает образование шнура с сечением, ограниченным размерами отверстий диафрагм. В установке "Токамак-3", пущенной в Институте атомной энергии имени И.В.Курчатова в 1962г., отверстие диафрагмы имело диаметр 20 см, диаметр поперечного сечения тора 40 см, диаметр внешнего кожуха 50 см, диаметр тора 2 м. Продольное магнитное поле до 4 Тл создавали восемь катушек с внешним диаметром около 1 м. Каждая катушка — это монолит из 352 медных витков, запеченных в эпоксидной смоле. Питание катушек производилось от ударного, т.е. кратковременно действующего, генератора мощностью около 75 тыс. кВт. В 1964г. пущена усовершенствованная установка "Токамак-5", в которой осуществлено автоматическое управление положением плазменного шнура внутри камеры.

В 1975г. вошла в строй установка "Токамак-10", обладающая рекордными, чрезвычайно обнадеживающими характеристиками. Дальнейшее развитие привело к разработке токамаков, обладающих параметрами, удовлетворяющими "критерию Лоусона". В принципе на этих токамаках мы вступим, по выражению академика Л.А.Арцимовича, в "термоядерное Эльдorado". И все же нельзя забывать о том, о чем говорил Л.А.Арцимович. Он часто подчеркивал, что еще в 1958г. на II Международной конференции по мирному использованию атомной энергии в Женеве, казалось, что до осуществления термоядерного синтеза рукой подать — нужно пройти небольшой путь между двумя точка-

ми; потом оказалось, что надо не пройти, а проехать на велосипеде; потом — что проехать на велосипеде, но по канату; потом оказалось, что велосипед одноколесный; потом — что ехать нужно с завязанными глазами; и наконец — что ехать необходимо задом наперед.

Результаты экспериментов на установках типа токамак чрезвычайно обнадеживающие. Подобные системы, по-видимому, будут широко применяться в дальнейших исследованиях.

Каким будет термоядерный генератор? Магнитная ловушка, по-видимому, получится весьма большой. Только тогда мощность, потребляемая ею, будет невелика по сравнению с мощностью генератора. Это происходит потому, что мощность генератора находится в кубической зависимости от линейного размера системы, а потребляемая обмотками мощность пропорциональна линейному размеру.

Исходя из соображений, касающихся мощности, потребляемой магнитной ловушкой, можно считать, что термоядерный генератор должен быть никак не меньше нескольких метров в диаметре. Только в этом случае полезная мощность генератора будет больше мощности, потребляемой магнитной системой.

Однако, если удастся создать громадные сверхпроводящие обмотки, что весьма реально, КПД генераторов резко возрастет.

Стоимость электроэнергии, получаемой от термоядерных электростанций, будет очень низкой вследствие дешевизны исходного сырья (воды). Настанет время, когда электростанции будут вырабатывать буквально океаны электроэнергии. С помощью этой электроэнергии станет возможным, быть может, не только кардинально изменить условия жизни на Земле — повернуть вспять реки, осушить болота, обводнить пустыни, — но и изменить облик окружающего космического пространства — заселить и "оживить" Луну, окружить Марс атмосферой.

Л.А.Арцимович писал: "Вряд ли есть какие-либо сомнения в том, что в конечном счете проблема управляемого синтеза будет решена. Природа может расположить на пути решения этой проблемы лишь ограниченное число трудностей, и после того, как человеку, благодаря непрерывному проявлению творческой активности, удастся их преодолеть, она уже не в состоянии будет изобрести новые. Неизвестно лишь, насколько затянется этот процесс..."

Одна из основных трудностей на этом пути — создание магнитного поля заданной геометрии и величины. Магнитные поля в современных термоядерных ловушках относительно невелики. Тем не менее если учесть громадные объемы камер, отсутствие ферромагнитного сердечника, а также специальные требования к форме магнитного поля, затрудняющие создание таких систем, то следует признать, что имеющиеся ловушки — большое техническое достижение.

Последние годы стали временем дальнейшего развития исследований с помощью токамаков. В СССР, США, Европе, Японии создаются все новые конструкции, призванные повысить параметры плазмы до значений, соответствующих термоядерной реакции. К числу наиболее характерных токамаков,

введенных в строй в последние годы, следует отнести Т-15 (СССР), JET (пущен в Англии, но создан совместными трудами ученых стран СЭВ), TFTR (США), JT-60 (Япония).

Токамак Т-15 интересен сверхпроводящей тороидальной обмоткой, что является перспективным техническим решением. Токамаки JET, TFTR, JT-60 также предназначены дать первые нейтроны термоядерной реакции. Для всех этих конструкций характерны крупные размеры: радиус камеры в пределах 2,6...3 м и радиус поперечного сечения камеры 0,85...1,25 м. Медные тороидальные обмотки создают круговое магнитное поле 3,5...5 Тл. Мощность генераторов, питающих эти обмотки во время режима работы, длящегося несколько секунд, составляет несколько сотен тысяч киловатт.

Специалисты СССР, США, Японии и европейских стран провели проектную проработку интернационального токамака-реактора — ИНТОР. Согласно проекту, опытный реактор содержит тороидальную камеру радиусом 5,2 и 1,4 м. В этом "бублике" объемом 320 м<sup>3</sup> горит плазма плотностью 1,4 · 10<sup>14</sup> част./см<sup>3</sup> с температурой 100 млн. градусов, "зажигаемая" током 6,4 млн. А, который наводится от индуктора, расположенного в центре камеры.

Стенка из нержавеющей стали охлаждается водой, за стенкой размещен "бланкет" толщиной полметра, в котором за год вырабатывается 7 кг трития. Магнитная система, колпаком укрывающая камеру, выполнена из медненных сверхпроводящих лент ниобия с оловом и ниобия с титаном. Она создает поле на обмотках 11,6 и 8 Тл, а в центре рабочей камеры — 5,5 Тл. В магнитном поле запасена энергия, равная 10 тыс. кВт·ч.

В проекте предусмотрено выделение 620 тыс. кВт термоядерной энергии в течение 200 с, импульсные нагрузки оборудования будут покрываться из электросети и от генератора мощностью 1 млн. кВт. Токамак типа "Интор" еще не может быть динамически выгодным источником энергии, он станет прообразом будущего реактора термоядерной электростанции.

На программу токамаков делается сегодня главная ставка, но не следует забывать, что ведутся исследования по другим вариантам термоядерных реакторов. Весьма перспективна дочерняя ветвь токамаков — открытые магнитные ловушки. Здесь результаты не так высоки, но еще далеко не все резервы исчерпаны.

Нет сомнений в том, что мы живем в преддверии энергетического господства ядерных реакторов синтеза. Из многих альтернативных конструкций наверняка удастся выбрать что-то подходящее. Конечно, "чистые" реакторы-синтезаторы, производящие электричество из водорода, появятся не сразу. Сначала термоядерные реакторы, видимо, будут помогать обогащать уран на нынешних АЭС. Со временем энергия нейтронов синтеза частично пойдет на осуществление своего электрогенераторного цикла. И уж тогда-то можно будет начать постепенный демонтаж урановых котлов.

## К энергетике XXI века

Энергетическая Программа СССР специально предусматривает создание необходимого научно-технического потенциала для производства электрооборудования на основе эффекта сверхпроводимости. Чем вызвано такое внимание к вопросам сверхпроводникового электрооборудования?

Сверхпроводники часто называют ключом к электротехнике будущего. Это объясняется их поистине удивительными свойствами.

Вообще-то, сверхпроводников как особых материалов не существует. Это обычные материалы из элементов таблицы Менделеева, у которых в определенных условиях появляются необычные свойства. Алюминий, например, считается хорошим проводником, неплохо пропускает тепло и в своей толще чуть усиливает магнитное поле (парамагнетик). При охлаждении ниже 1,2 К электропроводность алюминия возрастает бесконечно (сверхпроводник), теплопроводность так же сильно ухудшается (теплоизолятор), а магнитное поле в него уже не может проникнуть (диамагнетик).

Казалось бы, что за достижение столь полезных качеств надо платить слишком дорого — достижение низких температур — удовольствие недешевое. Оказалось, однако, что стоимость рефрижераторов и тепловой защиты холодных зон несравнима с достигаемыми преимуществами. Стало возможным без чрезмерных затрат получать огромные токи (в несколько тысяч раз большие, чем в обычных проводниках) и огромные магнитные поля при скромных сечениях токонесущих шин: именно это является чрезвычайно важным при создании мощных электроэнергетических устройств.

Единая энергетическая система СССР объединяет более 900 электростанций общей мощностью почти 300 тыс. МВт, но продолжается рост числа электрогенераторов и их единичной мощности. Выгода от создания крупных машин очевидна: при мощности 300 МВт нужен 1 кг металла на 1 кВт, а для машины мощностью 800 МВт — только 0,58 кг/кВт! Вот почему генераторы становятся все крупнее: в США созданы генераторы на 1050 МВт, во Франции — на 660; в Англии, ФРГ — на 600... 1300 и в СССР — на 1200 МВт. Работают крупнейшие в мире гидрогенераторы на Саяно-Шушенской ГЭС мощностью 800 МВт.

Допустим, необходимо построить электростанцию мощностью 2400 МВт. Обычно такую мощность обеспечивают восемь блоков по 300 МВт. А если взять более мощные машины? Укрупнение мощности энергоблоков на ГРЭС общей мощностью 2400 МВт с 300 до 800 МВт уменьшает удельные капиталовложения на 10,6%, снижает трудозатраты на 30%, повышает производительность труда в эксплуатации на 42% и уменьшает расход условного топлива на 4%.

Этим в основном и объясняется невиданный рост мощностей турбогенераторов: в 2 раза за каждые 7... 10 лет. Так быстро растут мощности разве что у двигателей ракет и самолетов. "Гигантомания" имеет, оказывается, прочную экономическую основу.



Дальнейший рост единичной мощности турбогенераторов существенно ограничивает техническую мощность роторов и бандажных колец. При частоте вращения 3000 об/мин на них действуют громадные центробежные усилия, тем большие, чем больше диаметр ротора. Так, в турбогенераторе на 100 МВт при частоте вращения 3000 об/мин диаметр ротора составляет 1000 мм, а в генераторе мощностью 1200 МВт - "всего" 1250 мм. При увеличении мощности в 12 раз диаметр ротора изменится лишь в 1,25 раза. При дальнейшем увеличении диаметра ротора его могут разорвать центробежные силы.

В настоящее время на Костромской ГРЭС успешно работает крупный советский двухполюсный турбогенератор ТВВ-1200-2. Его ротор цельнокованный из высококачественной легированной стали. Охлаждение обмоток ротора производится водородом, статора — водой. Сооружение этой машины стало для советской и мировой техники весьма знаменательным событием. Из числа многих технических трудностей, которые пришлось преодолеть машиностроителям, назовем лишь одну — создание цельной поковки ротора значительных габаритов. Инженеры и рабочие Ижорского завода имени А.А.Жданова с честью вышли из этого затруднения: металл для заготовки массой 230 т варили одновременно в мартеновской и двух электрических печах; сталеваром удалось обеспечить синхронность плавок. Так был создан самый крупный слиток в истории отечественной металлургии.

Технические данные советских турбогенераторов находятся сегодня на уровне характеристик лучших зарубежных машин, а зачастую и превосходят их. Одно из наиболее значительных зарубежных достижений — построенный в последние годы фирмой "Броун-Бовери" (ФРГ) турбогенератор мощностью 1300 МВт для АЭС "Библис". В отличие от большинства советских турбогенераторов у него невысокая частота вращения (1500 об/мин), что позволяет резко увеличить диаметр ротора (уменьшились центробежные усилия!), сделать его составным и увеличить объем машины. Вот некоторые данные этого крупнейшего в мире турбогенератора: мощность его 1300 МВт, КПД = 98,65%, статор и ротор охлаждаются водой, масса ротора 204 т, статора 371 т, диаметр ротора 1,8 м, длина 7,5 м.

Разобравшись в наиболее современных конструкциях турбогенераторов, можно заметить, что увеличение их мощности (повышающее экономичность электростанции и темпы, ввода мощностей) наталкивается на серьезные трудности. Одна из них — необходимость конструировать роторы диаметром, не превышающим 1350 мм. Такое требование обусловлено, во-первых, возможностями металлургической промышленности; во-вторых, достигнутым уже сейчас пределом механической прочности (при частоте вращения 3000 об/мин). Кроме того, увеличить длину ротора при заданном диаметре также невозможно из-за возникновения недопустимого прогиба вала и резонансных явлений.

Не меньшая проблема — бандажи лобовых частей обмотки ротора (каппы) большого диаметра из немагнитных материалов (составные роторы и бандажи

при частоте вращения 3000 об/мин не применяют вследствие низкой эксплуатационной надежности).

С ростом мощности и интенсификации охлаждения меняются и показатели турбогенераторов. Увеличивается токовая загрузка при сравнительно малой изменяющейся магнитной индукции (последняя ограничена магнитными свойствами материалов и не может быть существенно повышена). Резко снижается удельный расход материалов, несколько возрастает КПД.

Наибольшая мощность двухполюсных генераторов традиционных типов, которую, по-видимому, удастся реализовать в ближайшие 15 лет, будет 1500...2000 МВт, а наибольшая мощность четырехполюсных 3000...4000 МВт.

Ясно, что для создания генераторов большей мощности понадобятся новые конструкторские решения и материалы. В этой связи особые надежды ученые и инженеры возлагают на сверхпроводимость. Недаром одним из основных направлений развития науки намечены теоретические и экспериментальные исследования в области сверхпроводящих материалов, а одним из основных направлений развития техники — разработка сверхпроводниковых турбогенераторов. Сверхпроводящее электрооборудование позволит резко увеличить электрические и магнитные нагрузки в элементах устройств и благодаря этому резко сократить их размеры. В сверхпроводящем проводе допустима плотность тока, в 10...50 раз превышающая плотность тока в обычном электрооборудовании. Магнитные поля можно будет довести до значений порядка 10 Тл, по сравнению с 0,8... 1 Тл в обычных машинах. Если учесть, что размеры электротехнических устройств обратно пропорциональны произведению допустимой плотности тока на индукцию магнитного поля, то ясно, что применение сверхпроводников уменьшит размеры и массу электрооборудования во много раз!

По мнению одного из конструкторов системы охлаждения новых типов криогенных турбогенераторов советского ученого И.Ф.Филиппова, есть основание считать задачу создания экономичных криотурбогенераторов со сверхпроводниками решенной. Предварительные расчеты и исследования позволяют надеяться, что не только размеры и масса, но и КПД новых машин будут выше, чем у самых совершенных генераторов традиционной конструкции.

Это мнение разделяют руководители работ по созданию нового сверхпроводникового турбогенератора серии КТГ-1000 академик И.А.Глебов, доктора технических наук В.Г.Новицкий и В.Н.Шахтарин. Генератор КТГ-1000 испытан летом 1975г., за ним последовал модельный криогенный турбогенератор КТ-2-2, созданный объединением "Электросила" в содружестве с учеными Физико-технического института низких температур АН УССР. Результаты испытаний позволили приступить к постройке сверхпроводникового агрегата значительно большей мощности.

Приведем некоторые данные сверхпроводникового турбогенератора мощностью 1200 кВт, разработанного во ВНИИэлектромаш. Сверхпроводящая обмотка возбуждения выполнена из провода диаметром 0,7 мм с 37 сверхпроводящими жилами из ниобий-титана в медной матрице. Центробежные и

электродинамические усилия в обмотке воспринимаются бандажом из нержавеющей стали. Между наружной толстостенной оболочкой из нержавеющей стали и бандажом размещен медный электротермический экран, охлаждаемый потоком проходящего в канале холодного газообразного гелия (он затем возвращается в ожижитель).

Подшипники работают при комнатной температуре. Обмотка статора выполнена из медных проводников (охладитель — вода) и окружена ферромагнитным экраном из шихтованной стали. Ротор вращается в вакуумированном пространстве внутри оболочки из изоляционного материала. Сохранение вакуума в оболочке гарантируют уплотнители.

Опытный генератор КТГ-1000 был в свое время самым крупным по габаритам криотурбогенератором в мире. Цель его создания - - отработка конструкции вращающихся криостатов больших размеров, устройств подачи гелия к сверхпроводящей обмотке ротора, исследование тепловой схемы, работы сверхпроводящей обмотки ротора, его захолаживания.

А перспективы просто завораживают. Машина мощностью 1300 МВт будет иметь длину около 10 м при массе 280 т, в то время как аналогичная по мощности машина обычного исполнения имеет длину 20 м при массе 700 т! Наконец, обычную машину мощностью более 2000 МВт создать трудно, а при использовании сверхпроводников можно реально достичь единичной мощности 20 000 МВт!

Итак, на выигрыш в материалах приходится примерно три четверти себестоимости. Облегчаются производственные процессы. Любому машиностроительному заводу проще и дешевле сделать несколько крупных электрических машин, чем большое количество мелких: меньше требуется рабочих, не так напряженно загружаются станочный парк и другое оборудование.

Для установки мощного турбогенератора нужна относительно небольшая площадь электростанции. Значит, сокращаются расходы на сооружение машинного зала, станцию можно быстрее ввести в строй. И, наконец, чем крупнее электрическая машина, тем выше ее КПД.

Однако все эти преимущества не исключают технических трудностей, возникающих при создании крупных энергетических агрегатов. И, что самое существенное, их мощность можно увеличивать лишь до определенных пределов. Расчеты показывают, что перешагнуть верхний предел, ограниченный мощностью турбогенератора 2500 МВт, ротор которого вращается с частотой 3000 об/мин, не удастся, так как этот предел определяется, в первую очередь, прочностными характеристиками: напряжения в механической конструкции машины более высокой мощности возрастают настолько, что центробежные силы неизбежно вызовут разрушение ротора.

Немало забот возникает при транспортировке. Для перевозки того же турбогенератора мощностью 1200 МВт пришлось построить сочлененный транспортер грузоподъемностью 500 т, длиной почти 64 м. Каждая из двух его тележек опиралась на 16 вагонных осей.

Многие препятствия сами по себе отпадают, если использовать эффект сверхпроводимости и применить сверхпроводящие материалы. Тогда потери в роторной обмотке можно практически свести к нулю, так как постоянный ток не будет встречать в ней сопротивления. А раз так, повышается КПД машины. Протекающий по сверхпроводящей обмотке возбуждения ток большой силы создает столь сильное магнитное поле, что уже нет необходимости применять стальной магнитопровод, традиционный для любой электрической машины. Устранение стали снизит массу ротора и его инерционность.

Создание криогенных электрических машин — не дань моде, а необходимость, естественное следствие научно-технического прогресса. И есть все основания утверждать, что к концу века сверхпроводящие турбогенераторы мощностью более 1000 МВт будут работать в энергосистемах.

Первая в Советском Союзе электрическая машина со сверхпроводниками была спроектирована в Институте электромеханики в Ленинграде еще в 1962... 1963 гг. Это была машина постоянного тока с обычным ("теплым") якорем и сверхпроводниковой обмоткой возбуждения. Мощность ее составляла всего несколько ватт.

С тех пор коллектив института (сейчас — ВНИИЭлектромаш) работает над созданием сверхпроводящих турбогенераторов для энергетики. За истекшие годы удалось построить опытные конструкции мощностью 0,018 и 1 МВт, а затем и 20 МВт...

Каковы же особенности этого детища ВНИИЭлектромаша?

Сверхпроводящая обмотка возбуждения находится в гелиевой ванне. Жидкий гелий поступает во вращающийся ротор по трубе, расположенной в центре полого вала. Испарившийся газ направляется обратно в конденсационную установку через зазор между этой трубой и внутренней стенкой вала.

В конструкции трубопровода для гелия, как и в самом роторе, есть вакуумные полости, создающие хорошую теплоизоляцию. Вращающий момент от первичного двигателя подается к обмотке возбуждения через "тепловые мосты" — конструкцию, достаточно прочную механически, но плохо передающую тепло.

В итоге конструкция ротора представляет собой вращающийся криостат со сверхпроводящей обмоткой возбуждения.

Статор сверхпроводящего турбогенератора, как и в традиционном варианте, имеет трехфазную обмотку, в которой магнитным полем ротора возбуждается электродвижущая сила. Исследования показали, что применять сверхпроводящую обмотку в статоре нецелесообразно, так как на переменном токе в сверхпроводниках возникают немалые потери. Но в конструкции статора с "обычной" обмоткой есть свои особенности.

Обмотку оказалось возможным в принципе разместить в воздушном зазоре между статором и ротором и крепить по-новому, с помощью эпоксидных смол и конструктивных элементов из стеклопластика. Такая схема позволила разместить больше медных проводников в статоре.

Оригинальна и система охлаждения статора: тепло отводится фреоном, который одновременно выполняет и функцию изолятора. В перспективе это отведенное тепло можно будет использовать для практических целей с помощью теплового насоса.

В моторе турбогенератора мощностью 20 МВт был применен медный провод прямоугольного сечения 2,5 x 3,5 мм. В него впрессовано 3600 жил из ниобий-титана. Такой провод способен пропускать ток до 2200 А.

Испытания нового генератора подтвердили расчетные данные. Он оказался вдвое легче традиционных машин той же мощности, а его КПД выше на 1%. Сейчас этот генератор работает в системе "Ленэнерго" в качестве синхронного компенсатора и вырабатывает реактивную мощность.

Но основной итог работы — колоссальный опыт, накопленный в процессе создания турбогенератора. Опираясь на него, ленинградское электромашиностроительное объединение "Электросила" приступило к созданию турбогенератора мощностью уже 300 МВт, который будет установлен на одной из строящихся в нашей стране электростанций.

Сверхпроводящая обмотка возбуждения ротора изготовлена из ниобий-титанового провода. Устройство его необычно — тончайшие ниобий-титановые проводники запрессованы в медную матрицу. Сделано это для того, чтобы предотвратить переход обмотки из сверхпроводящего состояния в нормальное в результате воздействия флуктуаций магнитного потока или других причин. Если же это все-таки произойдет, ток потечет по медной матрице, тепло рассеется, сверхпроводящее состояние восстановится.

Технология изготовления собственно ротора потребовала внедрения принципиально новых технических решений. Если ротор обычной машины делают из цельной поковки магнитопроводящей стали, то в данном случае он должен состоять из нескольких вставленных один в другой цилиндров, изготовленных из стали немагнитной. Между стенками одних цилиндров находится жидкий гелий, между стенками других создан вакуум. Стенки цилиндров, естественно, должны обладать высокой механической прочностью, быть вакуумно-плотными.

Масса нового турбогенератора, так же как масса его предшественника, почти в 2 раза меньше массы обычного той же мощности, а КПД увеличен еще на 0,5...0,7%. Турбогенератор "живет" около 30 лет и большую часть времени находился в работе, поэтому совершенно очевидно, что такое, казалось бы, небольшое увеличение КПД будет весьма солидным выигрышем.

Энергетикам нужны не только холодные генераторы. Уже изготовлено и испытано несколько десятков сверхпроводящих трансформаторов (первый из них построен американцем Мак-Фи в 1961г.; трансформатор работал на уровне 15 кВт). Имеются проекты сверхпроводящих трансформаторов на мощность до 1 млн. кВт. При достаточно больших мощностях сверхпроводящие трансформаторы будут легче обычных на 40...50% при примерно одинаковых с обычными трансформаторами потерях мощности (в этих расчетах учитывалась и мощность ожигателя).

У сверхпроводящих трансформаторов, однако, есть и существенные недостатки. Они связаны с необходимостью защиты трансформатора от выхода его из сверхпроводящего состояния при перегрузках, коротких замыканиях, перегревах, когда магнитное поле, ток или температура могут достичь критических значений.

Если трансформатор при этом не разрушится, то потребуется несколько часов, чтобы снова охладить его и восстановить сверхпроводимость. В ряде случаев такой перерыв в электроснабжении неприемлем. Поэтому, прежде чем говорить о массовом изготовлении сверхпроводящих трансформаторов, необходимо разработать меры защиты от аварийных режимов и возможности обеспечения потребителей электроэнергией во время простоев сверхпроводящего трансформатора. Достигнутые в этой области успехи позволяют думать, что в ближайшем будущем проблема защиты сверхпроводящих трансформаторов будет решена, и они займут свое место на электростанциях.

В последние годы становится все более близкой к осуществлению мечта о сверхпроводящих линиях электропередачи. Все возрастающая потребность в электроэнергии делает очень привлекательной передачу большой мощности на большие расстояния. Советские ученые убедительно показали перспективность сверхпроводящих линий передачи. Стоимость линий будет сопоставима со стоимостью обычных воздушных линий передачи электроэнергии (стоимость сверхпроводника, если учесть высокое значение критической плотности его тока по сравнению с экономически целесообразной плотностью тока в медных или алюминиевых проводах, невелика) и ниже стоимости кабельных линий.

Осуществлять сверхпроводниковые линии электропередачи предполагается так: между конечными пунктами передачи в земле прокладывается трубопровод с жидким азотом. Внутри этого трубопровода располагается трубопровод с жидким гелием. Гелий и азот протекают по трубопроводам вследствие создания между исходным и конечным пунктами разности давлений. Таким образом, оживительно-насосные станции будут лишь на концах линии.

Жидкий азот можно использовать одновременно и в качестве диэлектрика. Гелиевый трубопровод поддерживается внутри азотного диэлектрическими стойками (у большинства изоляторов диэлектрические свойства при низких температурах улучшаются). Гелиевый трубопровод имеет вакуумную изоляцию. Внутренняя поверхность трубопровода жидкого гелия покрыта слоем сверхпроводника.

Потери в такой линии с учетом неизбежных потерь на концах линии, где сверхпроводник должен стыковаться с шинами при обычной температуре, не превысят нескольких долей процента, а в обычных линиях электропередачи потери в 5... 10 раз больше!

Силами ученых Энергетического института имени Г.М.Кржижановского и Всесоюзного научно-исследовательского института кабельной промышленности уже создана серия опытных отрезков сверхпроводящих кабелей переменного и постоянного тока. Подобные линии смогут передавать мощности во

много тысяч мегаватт при КПД более 99%, при умеренной стоимости и относительно невысоком (110...220 кВ) напряжении. Может быть, еще более важно, что сверхпроводящие линии электропередачи не будут нуждаться в дорогостоящих устройствах компенсации реактивной мощности. Обычные линии требуют установки токовых реакторов, мощных конденсаторов, чтобы нивелировать чрезмерные потери напряжения вдоль трассы, а линии на сверхпроводниках в состоянии себя самокомпенсировать!

Сверхпроводники оказались незаменимыми и в электрических машинах, принцип действия которых предельно прост, но которых никогда раньше не строили, ибо для их работы нужны очень сильные магниты. Речь идет о магнитогидродинамических (МГД) машинах, осуществить которые Фарадей пытался еще в 1831г.

Идея опыта проста. В воду Темзы на ее противоположных берегах погружали две металлические пластинки. Если скорость реки 0,2 м/с, то, уподобив струи воды проводникам, движущимся с запада на восток в магнитном поле Земли (его вертикальная составляющая примерно равна  $5 \cdot 10^{-5}$  Тл), с электродов можно снять напряжение примерно 10 мкВ/м.

К сожалению, этот опыт окончился неудачей, "генератор-река" не заработал. Фарадей не смог измерить тока в цепи. Но через несколько лет лорд Кельвин повторил опыт Фарадея и получил небольшой ток. Казалось бы, все осталось, как у Фарадея: те же пластины, та же река, те же приборы. Разве что место не совсем то. Кельвин построил свой генератор ниже по Темзе, там, где ее воды смешиваются с соленой водой пролива.

Вот она разгадка! Вода ниже по течению была более соленой и, следовательно, обладала большей проводимостью! Это было сразу же зарегистрировано приборами. Увеличение проводимости "рабочего тела" -- генеральный путь увеличения мощности МГД-генераторов. Но увеличить мощность можно и другим способом — повышая магнитное поле. Мощность МГД-генератора прямо пропорциональна квадрату напряженности магнитного поля.

Мечты об МГД-генераторах получили реальную основу примерно в середине нашего века вместе с появлением первых партий сверхпроводящих промышленных материалов (ниобий-титан, ниобий-цирконий), из которых удалось сделать первые, еще маленькие, но работающие модели генераторов, двигателей, токопроводов, соленоидов. А в 1962г. на симпозиуме в Ньюкасле англичане Вильсон и Роберт предложили проект МГД-генератора на 20 МВт с полем 4 Тл. Если обмотку сделать из медного провода, то при стоимости 0,6 мм/долл. джоулевы потери в ней "съедят" — полезной мощности (15 МВт!). Зато на сверхпроводниках обмотка будет компактно облежать рабочую камеру, потерь в ней не будет, а на охлаждение уйдет всего 100 кВт мощности. КПД возрастет с 25 до 99,5%! Тут есть о чем задуматься.

МГД-генераторами занялись всерьез во многих странах, потому что в таких машинах можно использовать плазму в 8... 10 раз более горячую, чем пар в турбинах тепловых электростанций, а при этом по известной формуле Карно

КПД будет уже не 40, а все 60%. Вот почему в ближайшие годы недалеко от Рязани заработает первый промышленный МГД-генератор на 500 МВт.

Конечно, создать и экономично использовать такую станцию непросто: нелегко разместить рядом поток плазмы (2500 К) и криостат с обмоткой в жидком гелии (4...5 К), раскаленные электроды обгорают и зашлаковываются, из шлаков надо выщелачивать те присадки, которые только что добавлялись в топливо для ионизации плазмы, но ожидаемые выгоды должны окупить все трудозатраты.

Можно представить себе, как выглядит сверхпроводящая магнитная система МГД-генератора. Две сверхпроводящие обмотки расположены по бокам канала с плазмой, отделенного от обмоток многослойной тепловой изоляцией. Обмотки закреплены в титановых кассетах, и между ними поставлены титановые распорки. Кстати сказать, эти кассеты и распорки должны быть чрезвычайно прочными, так как электродинамические силы в обмотках с током стремятся разорвать их и притянуть друг к другу.

Поскольку в сверхпроводящей обмотке тепло не выделяется, рефрижератор, который требуется для работы сверхпроводящей магнитной системы, должен отводить лишь то тепло, которое поступает в криостат с жидким гелием через тепловую изоляцию и токоподводы. Потери в токоподводах можно свести практически к нулю, если использовать короткозамкнутые сверхпроводящие катушки, питаемые от сверхпроводящего трансформатора постоянного тока.

Гелиевый ожижитель, который будет восполнять потери гелия, испаряющегося через изоляцию, по расчетам должен вырабатывать несколько десятков литров жидкого гелия в 1 ч. Такие ожижители выпускает промышленность.

Без сверхпроводящих обмоток были бы нереальными крупные токамаки. В установке "Токамак-7", например, обмотка массой 12 т обтекается током 4,5 кА и создает на оси плазменного тора объемом 6 м<sup>3</sup> магнитное поле 2,4 Тл. Это поле создается 48 сверхпроводящими катушками, потребляющими за час всего 150 л жидкого гелия, повторное сжижение которого требует мощности 300...400 кВт.

Не только большая энергетика нуждается в экономичных компактных мощных электромагнитах, без них трудно обойтись ученым, работающим с рекордно сильными полями. На порядок производительнее становятся установки для магнитного разделения изотопов. Уже не рассматриваются проекты крупных ускорителей без сверхпроводящих электромагнитов. Совершенно нереально обойтись без сверхпроводников на пузырьковых камерах, которые становятся чрезвычайно надежными и чувствительными регистраторами элементарных частиц. Так, одна из рекордно больших магнитных систем на сверхпроводниках (Аргоннская национальная лаборатория, США) создает поле 1,8 Тл с запасенной энергией 80 МДж. Исполинская обмотка массой 45 т (из них 400 кг ушло на сверхпроводник) при внутреннем диаметре 4,8 м, наружном 5,3 м и высоте 3 м требует для охлаждения до 4,2 К всего 500 кВт - ничтожно малую мощность.



Еще более внушительным представляется сверхпроводящий магнит пузырьковой камеры Европейского центра ядерных исследований в Женеве. Он имеет следующие характеристики: магнитное поле в центре до 3 Тл, внутренний диаметр "катушки" 4,7 м, запасенная энергия 800 МДж.

В конце 1977г. в Институте теоретической и экспериментальной физики (ИТЭФ) вступил в строй один из крупнейших в мире сверхпроводящих магнитов "Гиперон". Рабочая зона его имеет диаметр 1 м, поле в центре системы 5 Тл (!). Уникальный магнит предназначен для проведения экспериментов на протонном синхротроне ИФВЭ в Серпухове.

Осмыслив эти впечатляющие цифры, уже как-то неудобно говорить о том, что техническое освоение сверхпроводимости только начинается. В качестве примера можно напомнить о критических параметрах сверхпроводников. Если температура, давление, ток, магнитное поле превысят некоторые предельные значения, называемые критическими, сверхпроводник потеряет свои необычные свойства, превратившись в обычный материал.

Наличие фазового перехода вполне естественно использовать для контроля внешних условий. Если есть сверхпроводимость, значит, поле меньше критического, если у датчика восстановилось сопротивление — поле выше критического. Уже разработана серия самых разнообразных сверхпроводящих измерителей: болометр на спутнике может "почувствовать" зажженную спичку на Земле, гальванометры становятся чувствительнее в несколько тысяч раз; в резонаторах ультравысокой добротности колебания электромагнитного поля словно консервируются, ибо они чрезвычайно долго не затухают.

Среди сверхпроводящих устройств можно назвать детекторы альфа-частиц, криотроны (выпрямители), ячейки ЭВМ для схем памяти и переключения. Так, криоЭВМ настолько экономичны из-за отсутствия нагрева током, настолько чувствительны и компактны, что в объеме апельсина "уместится" обычная ЭВМ размером с комнату! Вот почему все ЭВМ кроме ручных компьютеров уже в нашем веке станут сверхпроводящими.

Уже много пишется про сверхпроводящие малоиндуктивные гальванометры (СЛАГи) и квантовые интерферометры на сверхпроводниках (СКВИДы), в которых полезно служат туннельные контакты. Их цель -- измерять малые магнитные поля, они могут зафиксировать даже квант магнитного потока! Вот почему магнитокардиографы намного точнее регистрируют состояние сердечно-сосудистой системы, чем электрокардиографы.

Теперь самое время окинуть взором всю электрическую часть энергетики, чтобы понять, как россыпь сверхпроводящих устройств может дать суммарный народнохозяйственный эффект. Сверхпроводники могут повысить единичную мощность энергоагрегатов, высоковольтная энергетика может постепенно превратиться в многоамперную, вместо четырех-шестикратного преобразования напряжения между электростанцией и потребителем реально говорить об одной-двух трансформациях с соответствующим упрощением и удешевлением схемы, общий КПД электрических сетей неминуемо вырастет вследствие джоулевых потерь. Но и это еще не все.

Электрические системы неизбежно приобретут другой вид, когда в них будут применять сверхпроводящие индуктивные накопители энергии (СПИН)! Дело в том, что из всех отраслей промышленности только в энергетике нет складов: выработанное тепло и электричество хранить негде, их надо потреблять сразу. Определенные надежды связаны со сверхпроводниками. Из-за отсутствия в них электрического сопротивления ток может циркулировать по замкнутому сверхпроводящему контуру сколь угодно долго без затухания до тех пор, пока не настанет время его отбора потребителем. СПИНЫ станут естественными элементами электрической сети, их остается только оснастить регуляторами, переключателями или преобразователями тока или частоты при объединении с источниками и потребителями электричества.

Энергоемкость СПИНов может быть самой различной — от 10 (энергия портфеля, выпавшего из рук) до 1 кВт-ч (глыба 10 т, упавшая со скалы 40 м) или 10 млн. кВт-ч! Столь мощный накопитель должен иметь размеры беговой дорожки вокруг футбольного поля, его цена будет составлять 500 млн. дол., а КПД — 95%. Равноценная гидроаккумулирующая электростанция окажется на 20% дешевле, но на свои нужды потратит треть мощности! Поучительна раскладка стоимости такого СПИНа по составляющим: на рефрижераторы 2...4%, на преобразователи тока 10%, на сверхпроводящую обмотку 15...20%, на теплоизоляцию холодной зоны 25%, а на бандажи, крепления и распорки — почти 50%.

Со времени доклада Г.М.Кржижановского по плану ГОЭЛРО на VIII Всероссийском съезде Советов прошло более полувека. Претворение этого плана в жизнь позволило повысить мощность электростанций страны с 1 до 200...300 млн. кВт. Теперь появляется принципиальная возможность усилить энергосистемы страны в несколько десятков раз, переведя их на сверхпроводящее электрооборудование и упростив сами принципы построения таких систем.

Основой энергетики начала XXI века могут стать атомные и термоядерные станции с чрезвычайно мощными электрогенераторами. Электрические поля, порожденные сверхпроводящими электромагнитами, могучими реками смогут перетекать по сверхпроводящим линиям электропередачи в сверхпроводящие накопители энергии, откуда по мере необходимости будут отбираться потребителями. Электростанции смогут равномерно вырабатывать мощность и днем, и ночью, а освобождение их от плановых режимов должно повысить экономичность и срок службы главных агрегатов.

К наземным электростанциям можно добавить космические солнечные станции. Зависнув над фиксированными точками планеты, они должны будут преобразовывать солнечные лучи в коротковолновое электромагнитное излучение, чтобы посылать сфокусированные потоки энергии к наземным преобразователям в токи промышленной назначения. Все электрооборудование наземно-космических электрических систем должно быть сверхпроводящим, в противном случае потери в проводниках конечной электропроводности окажутся, по-видимому, неприемлемо большими.

## Послесловие

Никогда во всей истории человечества еще не было периода, когда мировоззрение и благосостояние человека в столь сильной степени зависели бы от прогресса науки, как сейчас.

...Маленькой дрожащей стрелке, с одного конца выкрашенной в черный цвет, с другого — в красный, мы обязаны удивительными открытиями. Незвестные миры, экзотические животные, благоухающие острова, ледяные континенты и не знающие цивилизации народы предстали перед глазами изумленных "водителей фрегатов", сверявших свой путь с маленькой стрелкой компаса...

В огромном арсенале средств современной науки магнит занимает совершенно особое место. Без него невозможно никакое исследование, никакая наука, никакая промышленность, никакая цивилизованная жизнь. Если вспомнить еще и о том, что не обладай Земля магнитным полем, она была бы сейчас испепеленной космическим излучением планетой, как Марс, то можно почувствовать к магнитам нечто вроде благодарности.

Но кроме благодарности магнит достоин и уважения — ведь если мыслить в исторических масштабах, то приходится сознаться, что мы немногое еще можем сказать о природе притяжения магнита.

Почему магнит притягивает?

Этот вопрос еще сотни лет будет волновать умы мальчишек и ученых. Не станем переоценивать своих знаний. Кто это делает, часто попадает впросак. Вспомним, что было написано об электричестве в 1755г. в одном лондонском еженедельнике: "Электричество — сила, хорошо изученная человеком. Ее с успехом применяют для лечения болезней, эта сила способна ускорять развитие растений".

Эти слова были написаны до Фарадея, Ампера, Максвелла, когда люди, как теперь смело можно утверждать, почти ничего не знали об электричестве. А теперь, в начале XXI века, вряд ли какой-нибудь ученый найдет в себе смелость утверждать: "Электричество — сила, хорошо изученная человеком".

Мы много знаем об электричестве и магнетизме и с каждым днем узнаем все больше и больше. Но за одной проблемой встают другие, не менее сложные и интересные. Жизнь всегда будет полна загадок. И наряду с самыми сложными — загадкой жизни и загадкой Вселенной — загадка магнита всегда будет давать пищу для любознательного ума.

...Альберт Эйнштейн на всю жизнь запомнил тот день, когда ему, четырехлетнему ребенку, подарили новую игрушку — компас. На всю жизнь сохранил он детскую удивленность чудесными свойствами магнита, теми самыми свойствами, которые тысячи лет назад волновали наших предков.

Вряд ли когда-нибудь найдется человек, который возьмет на себя смелость утверждать: "Я постиг загадку магнита!" Однако ученые, познавшие удивительно небольшую толику тайны, смогли создать устройства, способные соперничать с самыми сильными магнитами, созданными природой.

## Литература

1. *Карцев В.П.* Магнит за три тысячелетия. 4-е изд., перераб. и доп. — М. Энергоатомиздат, 1988.
2. [www.n-t.org.ru](http://www.n-t.org.ru)

## Глава 2.

# ОСНОВЫ ТЕОРИИ МАГНИТНОГО ПОЛЯ

### 2.1. Магнитное взаимодействие токов

Магнитные явления были известны еще в древнем мире. Компас был изобретен более 4500 лет тому назад. Он появился в Европе приблизительно в XII веке новой эры. Однако только в XIX веке была обнаружена связь между электричеством и магнетизмом и возникло представление о *магнитном поле*.

Первыми экспериментами, показавшими, что между электрическими и магнитными явлениями имеется глубокая связь, были опыты датского физика Х.Эрстеда (1820г.). Эти опыты показали, что на магнитную стрелку, расположенную вблизи проводника с током, действуют силы, которые стремятся повернуть стрелку. В том же году французский физик А.Ампер наблюдал силовое взаимодействие двух проводников с токами и установил закон взаимодействия токов.

По современным представлениям, проводники с током оказывают силовое действие друг на друга не непосредственно, а через окружающие их магнитные поля.

Источниками магнитного поля являются **движущиеся** электрические заряды (токи). Магнитное поле возникает в пространстве, окружающем проводники с током, подобно тому, как в пространстве, окружающем неподвижные электрические заряды, возникает электрическое поле. Магнитное поле постоянных магнитов также создается электрическими микротоками, циркулирующими внутри молекул вещества (гипотеза Ампера).

Ученые XIX века пытались создать теорию магнитного поля по аналогии с электростатикой, вводя в рассмотрение так называемые **магнитные заряды** двух знаков (например, северный N и южный S полюса магнитной стрелки). Однако, опыт показывает, что изолированных магнитных зарядов не существует.

Магнитное поле токов принципиально отличается от электрического поля. Магнитное поле, в отличие от электрического, оказывает силовое действие **только** на движущиеся заряды (токи).

Для описания магнитного поля необходимо ввести силовую характеристику поля, аналогичную вектору напряженности  **$E$**  электрического поля. Такой характеристикой является *вектор магнитной индукции*  **$B$** . Вектор магнитной индукции  **$B$**  определяет силы, действующие на токи или движущиеся заряды в магнитном поле.

За положительное **направление вектора  $B$**  принимается направление от южного полюса S к северному полюсу N магнитной стрелки, свободно устанавливающейся в магнитном поле. Таким образом, исследуя магнитное поле, создаваемое током или постоянным магнитом, с помощью маленькой магнитной стрелки, можно в каждой точке пространства определить направление вектора  $B$ . Такое исследование позволяет представить пространственную структуру магнитного поля. Аналогично силовым линиям в электростатике можно построить **линии магнитной индукции**, в каждой точке которых вектор  $B$  направлен по касательной. Пример линий магнитной индукции полей постоянного магнита и катушки с током приведен на рис. 2.1.1.

Обратите внимание на аналогию магнитных полей постоянного магнита и катушки с током. Линии магнитной индукции всегда замкнуты, они нигде не обрываются. Это означает, что магнитное поле не имеет источников — магнитных зарядов. Силовые поля, обладающие этим свойством, называются вихревыми. Картину магнитной индукции можно наблюдать с помощью мел-

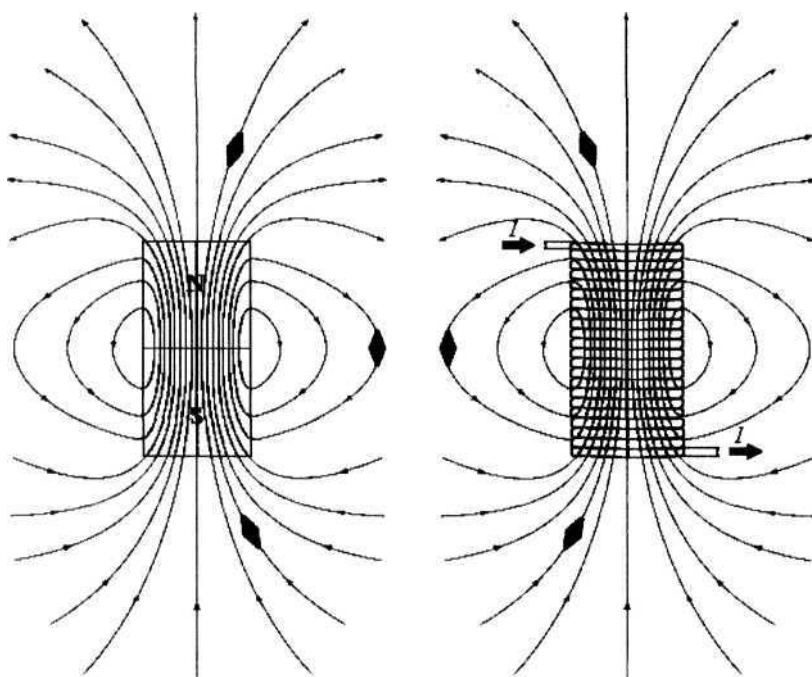


Рис. 2.1.1. Линии магнитной индукции полей постоянного магнита и катушки с током. Индикаторные магнитные стрелки ориентируются по направлению касательных к линиям индукции

ких железных опилок, которые в магнитном поле намагничиваются и, подобно маленьким магнитным стрелкам, ориентируются вдоль линий индукции.

Для того, чтобы количественно описать магнитное поле, нужно указать способ определения не только направления вектора но и его модуля. Проще всего это сделать, внося в исследуемое магнитное поле проводник с током и измеряя силу, действующую на отдельный прямолинейный участок этого проводника. Этот участок проводника должен иметь длину  $\Delta l$ , достаточно малую по сравнению с размерами областей неоднородности магнитного поля. Как показали опыты Ампера, сила, действующая на участок проводника, пропорциональна силе тока  $I$ , длине  $\Delta l$  этого участка и синусу угла — между направлениями тока и вектора магнитной индукции:

$$F \sim I\Delta l \sin\alpha$$

Эта сила называется **силой Ампера**. Она достигает максимального по модулю значения  $F_{\max}$ , когда проводник с током ориентирован перпендикулярно линиям магнитной индукции. Модуль вектора  $B$  определяется следующим образом:

Модуль вектора магнитной индукции равен отношению максимального значения силы Ампера, действующей на прямой проводник с током, к силе тока  $I$  в проводнике и его длине  $\Delta l$ :

$$B = \frac{F_{\max}}{I\Delta l}$$

В общем случае сила Ампера выражается соотношением:

$$F = IB\Delta l \sin\alpha$$

Это соотношение принято называть **законом Ампера**.

В системе единиц СИ за единицу магнитной индукции принята индукция такого магнитного поля, в котором на каждый метр длины проводника при силе тока  $1A$  действует максимальная сила Ампера  $1H$ . Эта единица называется **тесла** ( $Tл$ ).

$$1Tл = 1 \frac{H}{A \cdot м}$$

Тесла — очень крупная единица. Магнитное поле Земли приблизительно равно  $0,5 \cdot 10^{-4}$  Тл. Большой лабораторный электромагнит может создать поле не более 5Тл.

Сила Ампера направлена перпендикулярно вектору магнитной индукции  $B$  и направлению тока, текущего по проводнику. Для определения направления силы Ампера обычно используют **правило левой руки**: если расположить левую руку так, чтобы линии индукции  $B$  входили в ладонь, а вытянутые

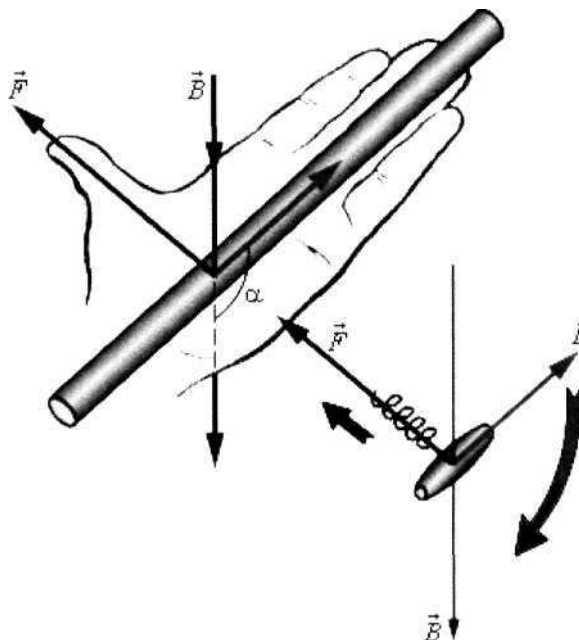


Рис. 2.1.2. Правило левой руки и правило буравчика

пальцы были направлены вдоль тока, то отведенный большой палец укажет направление силы, действующей на проводник (рис.2.1.2).

Если угол  $\alpha$  между направлениями вектора  $\vec{B}$  и тока в проводнике отличен от  $90^\circ$ , то для определения направления силы Ампера  $\vec{F}$  более удобно пользоваться **правилом буравчика**: воображаемый буравчик располагается перпендикулярно плоскости, содержащей вектор  $\vec{B}$  и проводник с током, затем его рукоятка поворачивается от направления тока к направлению вектора  $\vec{B}$ . Поступательное перемещение буравчика будет показывать направление силы Ампера  $\vec{F}$  (рис.2.2). Правило буравчика часто называют **правилом правого винта**.

Одним из важных примеров магнитного взаимодействия токов является взаимодействие параллельных токов. Закономерности этого явления были экспериментально установлены Ампером. Если по двум параллельным проводникам электрические токи текут в одну и ту же сторону, то наблюдается взаимное притяжение проводников. В случае, когда токи текут в противоположных направлениях, проводники отталкиваются.

**Взаимодействие токов вызывается их магнитными полями: магнитное поле одного тока действует силой Ампера на другой ток и наоборот.**

Опыты показали, что модуль силы, действующей на отрезок длиной  $\Delta l$  каждого из проводников, прямо пропорционален силам тока  $I_1$  и  $I_2$  в провод-



никах, длине отрезка  $\Delta l$  и обратно пропорционален расстоянию  $R$  между ними:

$$F = k \frac{I_1 I_2 \Delta l}{R}.$$

В Международной системе единиц СИ коэффициент пропорциональности  $k$  принято записывать в виде:

$$k = \mu_0 / 2\pi,$$

где  $\mu_0$  — постоянная величина, которую называют **магнитной постоянной**. Введение магнитной постоянной в СИ упрощает запись ряда формул. Ее численное значение равно

$$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Н/А}^2 \approx 1,26 \cdot 10^{-6} \text{ Н/А}^2$$

Формула, выражающая закон магнитного взаимодействия параллельных токов, принимает вид:

$$F = \frac{\mu_0 I_1 I_2 \Delta l}{2\pi R}$$

Отсюда нетрудно получить выражение для индукции магнитного поля каждого из прямолинейных проводников. Магнитное поле прямолинейного проводника с током должно обладать осевой симметрией и, следовательно, замкнутые линии магнитной индукции могут быть только концентрическими окружностями, располагающимися в плоскостях, перпендикулярных проводнику. Это означает, что векторы  $\mathbf{B}_1$  и  $\mathbf{B}_2$  магнитной индукции параллельных токов  $I_1$  и  $I_2$  лежат в плоскости, перпендикулярной обоим токам. Поэтому при вычислении сил Ампера, действующих на проводники с током, нужно в законе Ампера положить  $\sin\alpha=1$ . Из закона магнитного взаимодействия параллельных токов следует, что модуль индукции  $\mathbf{B}$  магнитного поля прямолинейного проводника с током  $I$  на расстоянии  $R$  от него выражается соотношением

$$B = \frac{\mu_0 I}{2\pi R}$$

Для того, чтобы при магнитном взаимодействии параллельные токи притягивались, а антипараллельные отталкивались, линии магнитной индукции поля прямолинейного проводника должны быть направлены по часовой стрелке, если смотреть вдоль проводника по направлению тока. Для определения направления вектора  $\mathbf{B}$  магнитного поля прямолинейного проводника также можно пользоваться правилом буравчика: направление вращения рукоятки

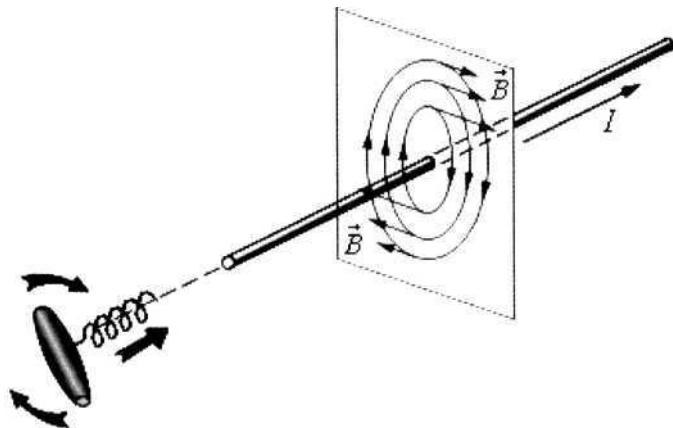


Рис. 2.1.3. Магнитное поле прямолинейного проводника с током

буравчика совпадает с направлением вектора  $B$  если при вращении буравчик перемещается в направлении тока (рис.2.1.3).

Рис.2.1.4. поясняет закон взаимодействия параллельных токов.

Магнитное взаимодействие параллельных проводников с током используется в Международной системе единиц (СИ) для определения единицы силы тока — ампера:

**Ампер** — сила неизменяющегося тока, который при прохождении по двум параллельным проводникам бесконечной длины и ничтожно малого кругового сечения, расположенным на расстоянии 1м один от другого в вакууме, вызвал бы между этими проводниками силу магнитного взаимодействия, равную  $2 \cdot 10^{-7}$  Н на каждый метр длины.

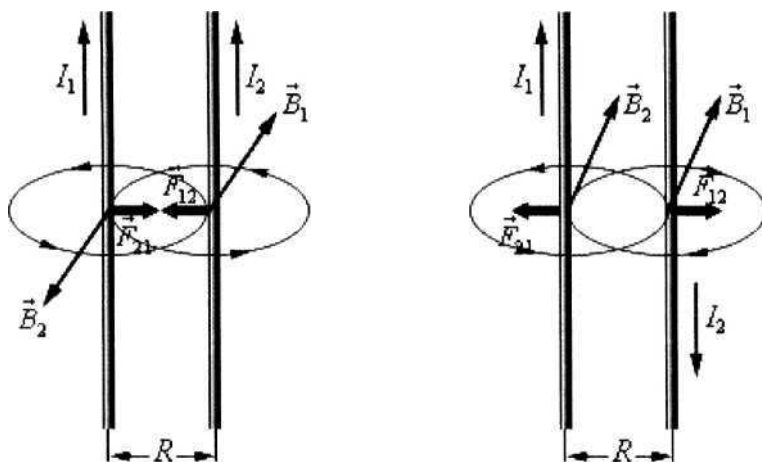
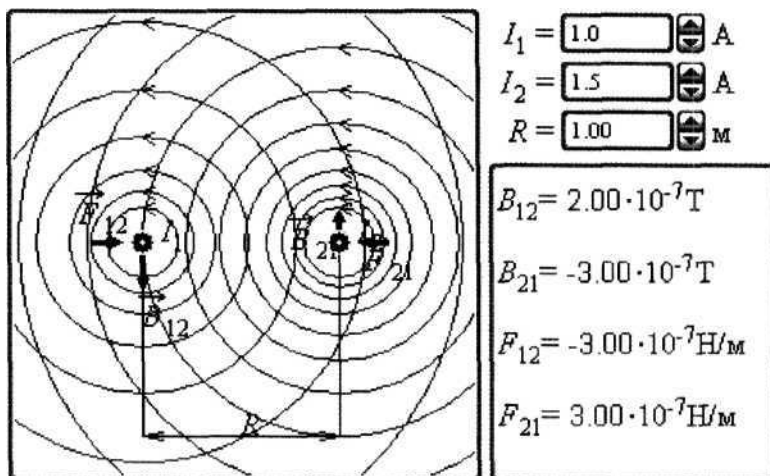
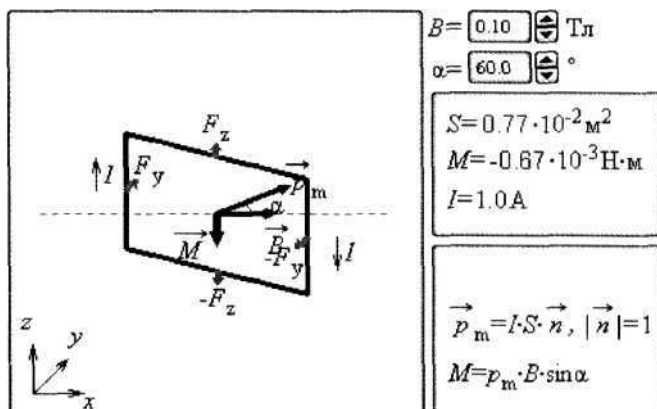


Рис. 2.1.4. Магнитное взаимодействие параллельных и антипараллельных токов



Модель. Взаимодействие параллельных токов



Модель. Рамка с током в магнитном поле

Компьютерная модель является иллюстрацией эксперимента по магнитному взаимодействию параллельных токов. Этот эксперимент положен в основу определения ампера (А) — единицы силы тока в системе СИ. Можно изменять силы токов, текущих в параллельных проводниках, а также расстояние между ними. На дисплее высвечиваются значения индукции магнитного поля  $B$  (синий цвет) и сил Ампера  $F$  (красный цвет), действующих на единицу длины каждого из проводников.

На рамку с током  $I$ , помещенную во внешнее однородное магнитное поле с индукцией  $B$  действует момент сил  $B$ . Момент сил выражается соотношением:

$$M = ISB \sin \alpha = p_m B \sin \alpha,$$

где  $S$  — площадь рамки,  $\alpha$  — угол между нормалью  $\mathbf{n}$  к плоскости рамки и вектором  $\mathbf{B}$ . Векторная величина  $\mathbf{p}_m = IS\mathbf{n}$ , где  $\mathbf{n}$  — единичный вектор нормали, называется магнитным моментом рамки. Направление вектора связано с направлением тока в рамке правилом правого винта.

Компьютерная модель демонстрирует возникновение момента сил, действующего на рамку с током в магнитном поле. Значение момента сил может быть определено при различных ориентациях рамки относительно магнитного поля. При выполнении компьютерных экспериментов можно изменять индукцию магнитного поля, площадь рамки (с помощью мыши) и ее ориентацию.

## 2.2. Закон Био-Савара. Теорема о циркуляции

Магнитное поле постоянных токов различной конфигурации изучалось экспериментально французскими учеными Ж.Био и Ф.Саваром (1820г.). Они пришли к выводу, что индукция магнитного поля токов, текущих по проводнику, определяется совместным действием всех отдельных участков проводника. Магнитное поле подчиняется **принципу суперпозиции**:

**Если магнитное поле создается несколькими проводниками с током, то индукция результирующего поля есть векторная сумма индукций полей, создаваемых каждым проводником в отдельности.**

Индукцию  $\mathbf{B}$  проводника с током можно представить как векторную сумму элементарных индукций  $\Delta\mathbf{B}$ , создаваемых отдельными участками проводника. На опыте невозможно осуществить отдельный участок проводника с током, так как постоянные токи всегда замкнуты. Можно измерить только суммарную индукцию магнитного поля, создаваемого всеми элементами тока. **Закон Био-Савара** определяет вклад  $\Delta\mathbf{B}$  в магнитную индукцию результирующего магнитного поля, создаваемый малым участком  $\Delta l$  проводника с током  $I$ .

$$\Delta B = \frac{\mu_0 I \Delta l \sin \alpha}{4\pi r^2}$$

Здесь  $r$  — расстояние от данного участка  $\Delta l$  до точки наблюдения,  $\alpha$  — угол между направлением на точку наблюдения и направлением тока на данном участке,  $\mu_0$  — магнитная постоянная. Направление вектора  $\Delta\mathbf{B}$  определяется правилом буравчика: оно совпадает с направлением вращения рукоятки буравчика при его поступательном перемещении вдоль тока. Рис.2.2.1 иллюстрирует закон Био-Савара на примере магнитного поля прямолинейного проводника с током. Если просуммировать (проинтегрировать) вклады в магнитное поле всех отдельных участков прямолинейного проводника с током, то получится формула для магнитной индукции поля прямого тока:

$$B = \frac{\mu_0 I}{2\pi R}$$

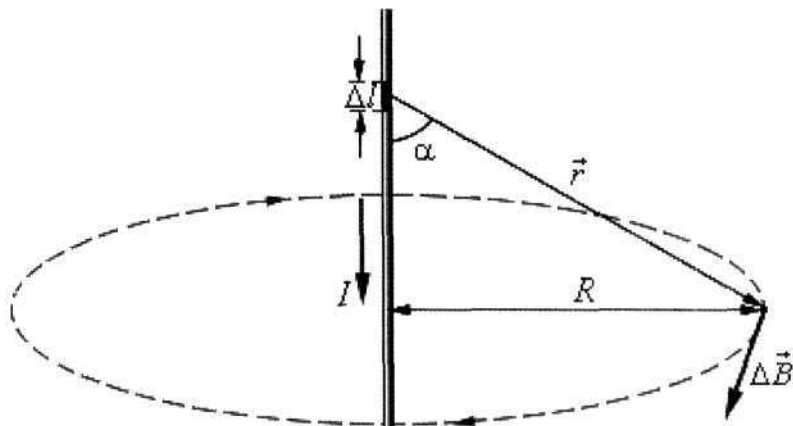


Рис. 2.2.1. Иллюстрация закона Био-Савара

которая уже приводилась в 2.2.1.

Закон Био-Савара позволяет рассчитывать магнитные поля токов различных конфигураций. Нетрудно, например, выполнить расчет магнитного поля в центре кругового витка с током. Этот расчет приводит к формуле

$$B = \frac{\mu_0 I}{2R}$$

где  $R$  — радиус кругового проводника. Для определения направления вектора  $\mathbf{B}$  также можно использовать правило буравчика, только теперь его рукоятку нужно вращать в направлении кругового тока, а поступательное перемещение буравчика укажет направление вектора магнитной индукции.

Расчеты магнитного поля токов часто упрощаются при учете симметрии в конфигурации токов, создающих поле. В этом случае расчеты можно выполнять с помощью **теоремы о циркуляции вектора магнитной индукции**, которая в теории магнитного поля токов играет ту же роль, что и теорема Гаусса в электростатике.

Поясним понятие циркуляции вектора  $\mathbf{B}$ . Пусть в пространстве, где создано магнитное поле, выбран некоторый условный замкнутый контур (не обязательно плоский) и указано положительное направление обхода контура. На каждом отдельном малом участке  $\Delta l$  этого контура можно определить касательную составляющую  $B_l$  вектора в данном месте, то есть определить проекцию вектора  $\mathbf{B}$  на направление касательной к данному участку контура (рис.2.2.2).

Циркуляцией вектора  $\mathbf{B}$  называют сумму произведений  $B_l \Delta l$ , взятую по всему контуру  $L$ :

$$\text{Циркуляция вектора } \mathbf{B} = \sum_{(L)} B_l \Delta l$$

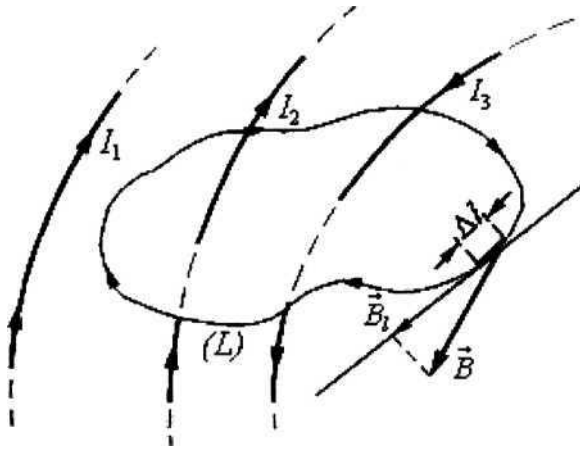


Рис. 2.2.2. Замкнутый контур  $(L)$  с заданным направлением обхода.  
Изображены токи  $I_1$ ,  $I_2$  и  $I_3$ , создающие магнитное поле

Некоторые токи, создающие магнитное поле, могут пронизывать выбранный контур  $L$  в то время, как другие токи могут находиться в стороне от контура.

Теорема о циркуляции утверждает, что циркуляция вектора  $\vec{B}$  магнитного поля постоянных токов по любому контуру  $L$  всегда равна произведению магнитной постоянной  $\mu_0$  на сумму всех токов, пронизывающих контур:

$$\sum_{(L)} B_l \Delta l = \mu_0 \sum I_i.$$

В качестве примера на рис.2.2.2 изображены несколько проводников с токами, создающими магнитное поле. Токи  $I_2$  и  $I_3$  пронизывают контур  $L$  в противоположных направлениях, им должны быть приписаны разные знаки — положительными считаются токи, которые связаны с выбранным направлением обхода контура правилом правого винта (буравчика). Следовательно,  $I_3 > 0$ , а  $I_2 < 0$ . Ток  $I_1$  не пронизывает контур  $L$ .

Теорема о циркуляции в данном примере выражается соотношением:

$$\sum_{(L)} B_l \Delta l = \mu_0 (I_3 - I_2).$$

Теорема о циркуляции в общем виде следует из закона Био-Савара и принципа суперпозиции.

Простейшим примером применения теоремы о циркуляции является определение магнитной индукции поля прямолинейного проводника с током.

Учитывая симметрию в данной задаче, контур  $L$  целесообразно выбрать в виде окружности некоторого радиуса  $R$ , лежащей в перпендикулярной проводнику плоскости. Центр окружности находится в некоторой точке проводника. В силу симметрии вектор  $B$  направлен по касательной ( $B_l = B$ ), а его модуль одинаков во всех точках окружности. Применение теоремы о циркуляции приводит к соотношению:

$$\sum_{(L)} B_l \Delta l = 2\pi R B = \mu_0 I$$

откуда следует формула для модуля магнитной индукции поля прямолинейного проводника с током, приведенная ранее.

Этот пример показывает, что теорема о циркуляции вектора магнитной индукции  $B$  может быть использована для расчета магнитных полей, создаваемых симметричным распределением токов, когда из соображений симметрии можно "угадать" общую структуру поля.

Имеется немало практически важных примеров расчета магнитных полей с помощью теоремы о циркуляции. Одним из таких примеров является задача вычисления поля тороидальной катушки (рис.2.2.3).

Предполагается, что катушка плотно, то есть виток к витку, намотана на немагнитный тороидальный сердечник. В такой катушке линии магнитной индукции замыкаются внутри катушки и представляют собой концентрические окружности. Они направлены так, что глядя вдоль них, мы увидели бы ток в витках, циркулирующим по часовой стрелке. Одна из линий индукции некоторого радиуса  $r_1 \leq r < r_2$  изображена на рис.2.2.3. Применим теорему о циркуляции к контуру  $L$  в виде окружности, совпадающей с изображенной на

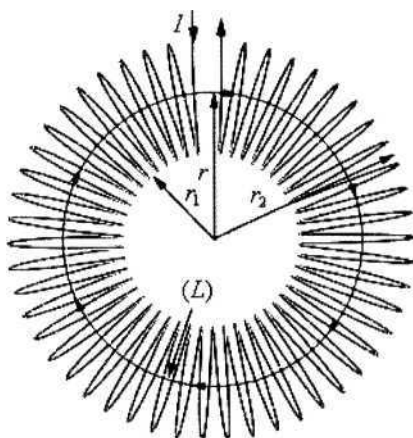


Рис. 2.2.3. Применение теоремы о циркуляции к тороидальной катушке

рис.2.2.3 линией индукции магнитного поля. Из соображений симметрии ясно, что модуль вектора  $B$  одинаков вдоль всей этой линии. По теореме о циркуляции можно записать:

$$B \cdot 2\pi r = \mu_0 IN,$$

где  $N$  — полное число витков, а  $I$  — ток, текущий по виткам катушки. Следовательно,

$$B = \frac{\mu_0 IN}{2\pi r}.$$

Таким образом, модуль вектора магнитной индукции в тороидальной катушке зависит от радиуса  $r$ . Если сердечник катушки тонкий, то есть  $r_2 - r_1 \ll r$ , то магнитное поле внутри катушки практически однородно. Величина  $n = N / 2\pi r$  представляет собой число витков на единицу длины катушки. В этом случае

$$B = \mu_0 In.$$

В это выражение не входит радиус тора, поэтому оно справедливо и в предельном случае  $r \rightarrow \infty$ . Но в пределе каждую часть тороидальной катушки можно рассматривать как длинную прямолинейную катушку. Такие катушки называют **соленоидами**. Вдали от торцов соленоида модуль магнитной индукции выражается тем же соотношением, что и в случае тороидальной катушки.

На рис.2.2.4 изображено магнитное поле катушки конечной длины. Следует обратить внимание на то, что в центральной части катушки магнитное

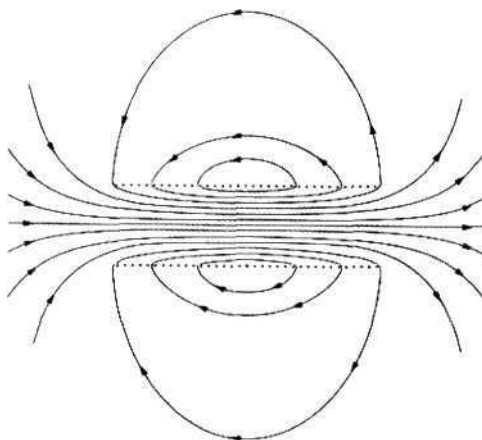


Рис. 2.2.4. Магнитное поле катушки конечной длины.

В центре соленоида магнитное поле практически однородно и значительно превышает по модулю поле вне катушки



поле практически однородно и значительно сильнее, чем вне катушки. На это указывает густота линий магнитной индукции. В предельном случае бесконечно длинного соленоида однородное магнитное поле целиком сосредоточено внутри соленоида.

В случае бесконечно длинного соленоида выражение для модуля магнитной индукции можно получить непосредственно с помощью теоремы о циркуляции, применив ее к прямоугольному контуру, показанному на рис.2.2.5.

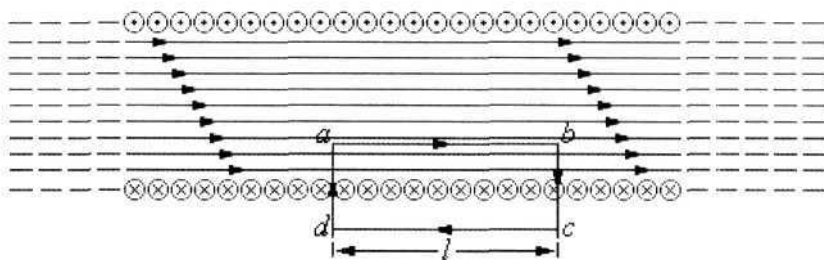


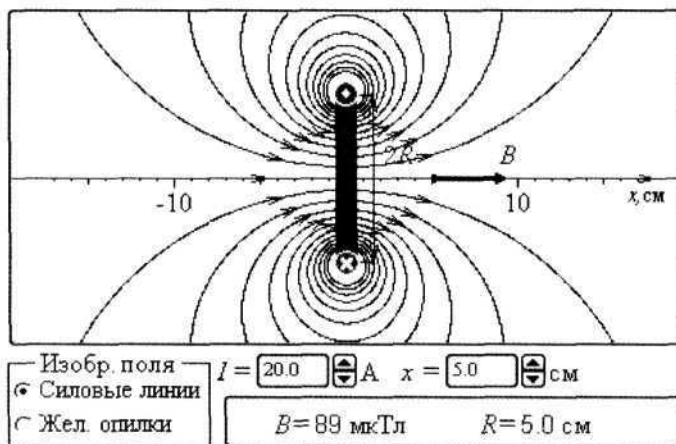
Рис. 2.2.5. Применение теоремы о циркуляции к расчету магнитного поля бесконечно длинного соленоида

Вектор магнитной индукции имеет отличную от нуля проекцию на направление обхода контура  $abcd$  только на стороне  $ab$ . Следовательно, циркуляция вектора  $B$  по контуру равна  $Bl$ , где  $l$  – длина стороны  $ab$ . Число витков соленоида, пронизывающих контур  $abcd$ , равно  $nl$ , где  $n$  – число витков на единицу длины соленоида, а полный ток, пронизывающий контур, равен  $Inl$ . Согласно теореме о циркуляции,  $Bl = \mu_0 Inl$ , откуда  $B = \mu_0 In$ .

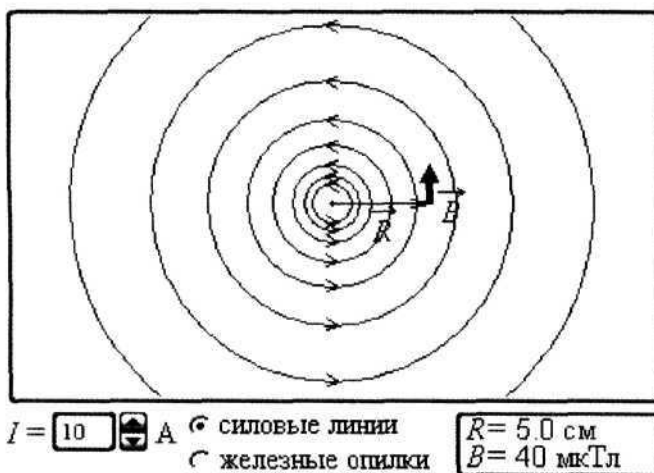
Это выражение совпадает с полученной ранее формулой для магнитного поля тонкой тороидальной катушки.

Магнитное поле кругового тока имеет сложную структуру. Сравнительно просто оно рассчитывается с помощью закона Био-Савара только для точек, лежащих на оси витка. Компьютерная модель иллюстрирует структуру магнитного поля кругового тока и позволяет количественно измерять магнитное поле на оси. Качественная структура может быть показана в демонстрационном эксперименте с железными опилками.

Модель демонстрирует линии индукции магнитного поля прямого проводника при различных значениях силы тока. Индукция магнитного поля может быть измерена в любой точке экрана. За положительное направление вектора выбрано направление против часовой стрелки. Можно убедиться, что индукция магнитного поля прямого тока изменяется обратно пропорционально расстоянию до проводника.



Модель. Магнитное поле кругового витка с током

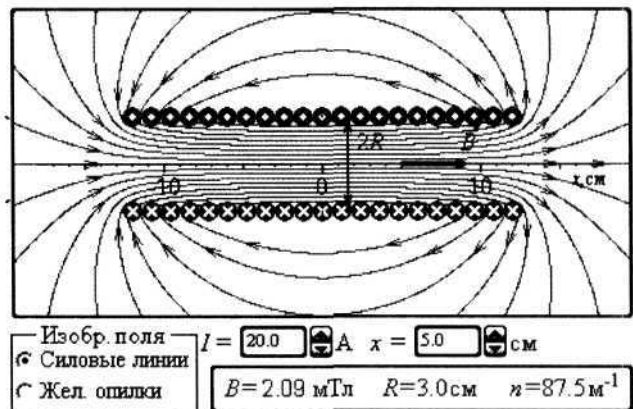


Модель. Магнитное поле прямого тока

Структура магнитного поля может быть продемонстрирована в качественном эксперименте с железными опилками.

Соленоидом называют длинную прямолинейную катушку, плотно намотанную виток к витку. Магнитное поле внутри соленоида однородно. Однородность поля нарушается только вблизи концов катушки.

Компьютерная модель демонстрирует структуру магнитного поля соленоида и позволяет производить измерения индукции магнитного поля в различных точках на оси катушки. Для качественной демонстрации структуры магнитного поля соленоида можно использовать опыт с железными опилками.



Модель. Магнитное поле соленоида

## 2.3. Сила Лоренца

Сила Ампера, действующая на отрезок проводника длиной  $\Delta l$  с силой тока  $I$ , находящийся в магнитном поле  $B$ ,

$$F = IB\Delta l \sin \alpha$$

может быть выражена через силы, действующие на отдельные носители заряда.

Пусть концентрация носителей свободного заряда в проводнике есть  $n$ , а  $q$  — заряд носителя. Тогда произведение  $nqvS$ , где  $v$  — модуль скорости упорядоченного движения носителей по проводнику, а  $S$  — площадь поперечного сечения проводника, равно току, текущему по проводнику:

$$I = dnvS.$$

Выражение для силы Ампера можно записать в виде:

$$F = d n S \Delta l v B \sin \alpha$$

Так как полное число  $N$  носителей свободного заряда в проводнике длиной  $\Delta l$  и сечением  $S$  равно  $nS\Delta l$ , то сила, действующая на одну заряженную частицу, равна

$$F_{\text{sub } L} = q v B \sin \alpha$$

Эту силу называют **силой Лоренца**. Угол  $\alpha$  в этом выражении равен углу между скоростью  $v$  и вектором магнитной индукции  $B$ . Направление силы

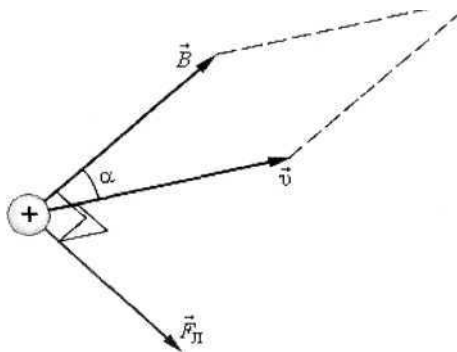


Рис. 2.3.1. Взаимное расположение векторов  $\mathbf{v}$ ,  $\mathbf{B}$  и  $\mathbf{F}_L$ . Модуль силы Лоренца  $F_L$  численно равен площади параллелограмма, построенного на векторах  $\mathbf{v}$ ,  $\mathbf{B}$  и помноженной на заряд  $q$

Лоренца, действующей на положительно заряженную частицу, так же, как и направление силы Ампера, может быть найдено по правилу левой руки или по правилу буравчика. Взаимное расположение векторов  $\mathbf{v}$ ,  $\mathbf{B}$  и  $\mathbf{F}_L$  для положительно заряженной частицы показано на рис.2.3.1.

Сила Лоренца направлена перпендикулярно векторам  $\mathbf{v}$  и  $\mathbf{B}$ .

**При движении заряженной частицы в магнитном поле сила Лоренца работы не совершает.** Поэтому модуль вектора скорости при движении частицы не изменяется.

Если заряженная частица движется в однородном магнитном поле под действием силы Лоренца, а ее скорость  $\mathbf{v}$  лежит в плоскости, перпендикулярной вектору  $\mathbf{B}$  то частица будет двигаться по окружности радиуса

$$R = \frac{mv}{qB}$$

Сила Лоренца в этом случае играет роль центростремительной силы (рис.2.3.2).

Период обращения частицы в однородном магнитном поле равен

$$T = \frac{2\pi R}{v} = \frac{2\pi m}{qB}$$

Это выражение показывает, что для заряженных частиц заданной массы  $m$  период обращения не зависит от скорости — и радиуса траектории  $R$ .

Угловая скорость движения заряженной частицы по круговой траектории

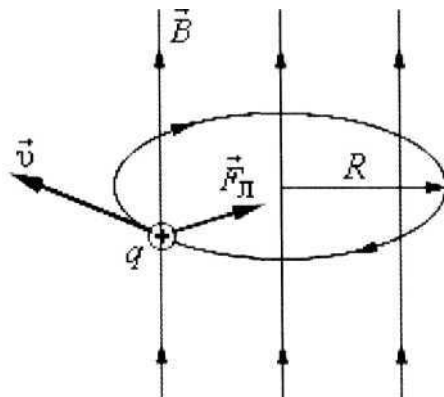


Рис. 2.3.2. Круговое движение заряженной частицы в однородном магнитном поле

$$\omega = \frac{v}{R} = v \frac{dB}{mv} = \frac{qB}{m}$$

называется **циклотронной частотой**. Циклотронная частота не зависит от скорости (следовательно, и от кинетической энергии) частицы. Это обстоятельство используется в **циклотронах** — ускорителях тяжелых частиц (протонов, ионов). Принципиальная схема циклотрона приведена на рис.2.3.3.

Между полюсами сильного электромагнита помещается вакуумная камера, в которой находятся два электрода в виде полых металлических полуцилиндров (**дуантов**). К дуантам приложено переменное электрическое напря-

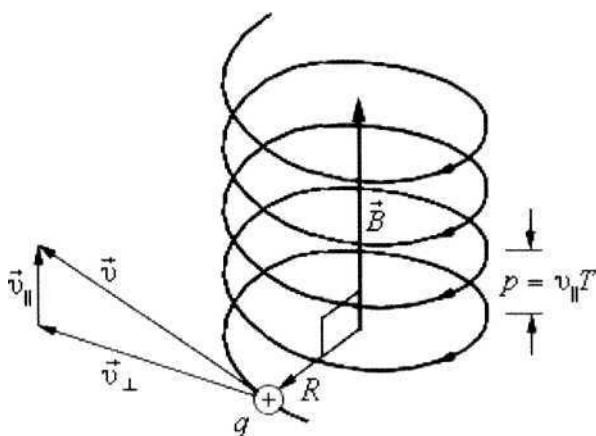


Рис. 2.3.3. Движение заряженных частиц в вакуумной камере циклотрона

жение, **частота которого равна циклотронной частоте**. Заряженные частицы инжектируются в центре вакуумной камеры. Частицы ускоряются электрическим полем в промежутке между дуантами. Внутри дуантов частицы движутся под действием силы Лоренца по полуокружностям, радиус которых растет по мере увеличения энергии частиц. Каждый раз, когда частица пролетает через зазор между дуантами, она ускоряется электрическим полем. Таким образом, в циклотроне, как и во всех других ускорителях, заряженная частица ускоряется электрическим полем, а удерживается на траектории магнитным полем. Циклотроны позволяют ускорять протоны до энергии порядка 20 МэВ.

Однородные магнитные поля используются во многих приборах и, в частности, в **масс-спектрометрах** - устройствах, с помощью которых можно измерять массы заряженных частиц - ионов или ядер различных атомов. Масс-спектрометры используются для разделения изотопов, то есть ядер атомов с одинаковым зарядом, но разными массами (например,  $^{20}\text{Ne}$  и  $^{22}\text{Ne}$ ). Простейший масс-спектрометр показан на рис. 2.3.4. Ионы, вылетающие из источника S, проходят через несколько небольших отверстий, формирующих узкий пучок. Затем они попадают в **селектор скоростей**, в котором частицы движутся в скрещенных однородных электрическом и магнитном полях. Электрическое поле создается между пластинами плоского конденсатора, магнитное поле — в зазоре между полюсами электромагнита. Начальная скорость  $v$  заряженных частиц направлена перпендикулярно векторам  $E$  и  $B$ .

На частицу, движущуюся в скрещенных электрическом и магнитном полях, действуют электрическая сила  $qE$  и магнитная сила Лоренца. При условии  $E=vB$  эти силы точно уравниваются друг друга. Если это условие выполняется, частица будет двигаться равномерно и прямолинейно и, пролетев через конденсатор, пройдет через отверстие в экране. При заданных значениях электрического и магнитного полей селектор выделит частицы, движущиеся со скоростью  $v=E/B$ .

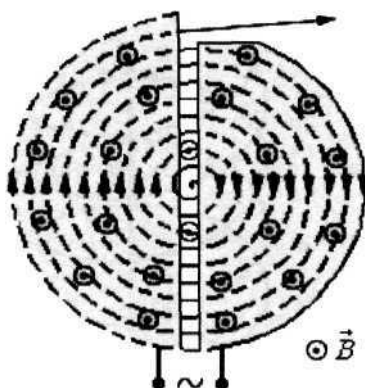


Рис. 2.3.4. Селектор скоростей и масс-спектрометр

Далее частицы с одним и тем же значением скорости попадают в камеру масс-спектрометра, в которой создано однородное магнитное поле  $\vec{B}'$ . Частицы движутся в камере в плоскости, перпендикулярной магнитному полю, под действием силы Лоренца. Траектории частиц представляют собой окружности радиусов  $R = mv/qB'$ . Измеряя радиусы траекторий при известных значениях — и  $B'$  можно определить отношение  $q/m$ . В случае изотопов ( $q_1 = q_2$ ) масс-спектрометр позволяет разделить частицы с разными массами.

Современные масс-спектрометры позволяют измерять массы заряженных частиц с точностью выше  $10^{-4}$ .

Если скорость частицы  $\vec{v}$  имеет составляющую  $v_{\parallel}$  вдоль направления магнитного поля, то такая частица будет двигаться в однородном магнитном поле по спирали. При этом радиус спирали  $R$  зависит от модуля перпендикулярной магнитному полю составляющей  $|\vec{v}_{\perp}|$  вектора  $\vec{v}$ , а шаг спирали  $p$  — от модуля продольной составляющей  $v_{\parallel}$  (рис.2.3.5).

Таким образом, траектория заряженной частицы как бы навивается на линии магнитной индукции. Это явление используется в технике **для магнитной термоизоляции высокотемпературной плазмы**, то есть полностью ионизированного газа при температуре порядка 10 К. Вещество в таком состоянии получают в установках типа "Токамак" при изучении управляемых термоядерных реакций. Плазма не должна соприкасаться со стенками камеры. Термоизоляция достигается путем создания магнитного поля специальной конфи-

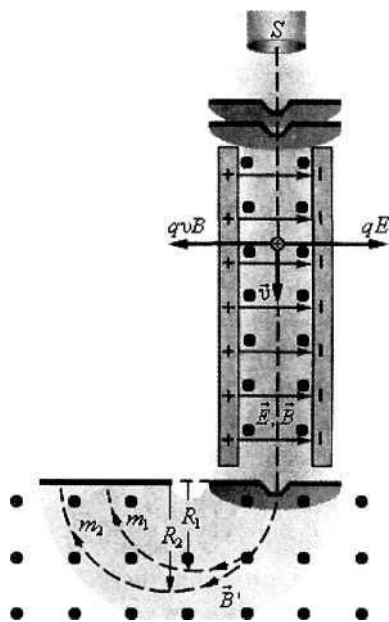


Рис. 2.3.5. Движение заряженной частицы по спирали в однородном магнитном поле

ругации. В качестве примера на рис.2.3.6 изображена траектория движения заряженной частицы в магнитной "бутылке" (или *ловушке*).

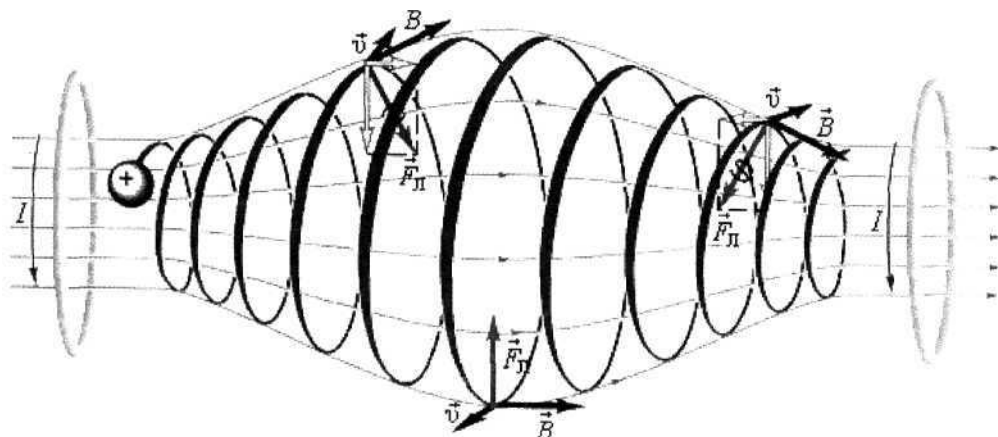


Рис. 2.3.6. Магнитная "бутылка". Заряженные частицы не выходят за пределы "бутылки". Магнитное поле "бутылки" может быть создано с помощью двух круглых катушек с током

Аналогичное явление происходит в магнитном поле Земли, которое является защитой для всего живого от потоков заряженных частиц из космического пространства. Быстрые заряженные частицы из космоса (главным образом от Солнца) "захватываются" магнитным полем Земли и образуют так называемые **радиационные пояса** (рис.2.3.7), в которых частицы, как в магнитных ловушках, перемещаются туда и обратно по спиралевидным траекториям между северным и южным магнитными полюсами за времена порядка долей секунды. Лишь в полярных областях некоторая часть частиц вторгается в верхние слои атмосферы, вызывая полярные сияния. Радиационные пояса Земли простираются от расстояний порядка 500км до десятков земных радиусов. Следует вспомнить, что южный магнитный полюс Земли находится вблизи северного географического полюса (на северо-западе Гренландии). Природа земного магнетизма до сих пор не изучена.

На заряженную частицу с зарядом  $q$ , движущуюся со скоростью  $\mathbf{v}$  в магнитном поле с индукцией  $\mathbf{B}$  действует сила Лоренца:

$$F_L = qB \sin \alpha$$

где  $\alpha$  — угол между векторами  $\mathbf{v}$  и  $\mathbf{B}$ . Сила Лоренца работы не совершает, так как всегда направлена перпендикулярно скорости заряженной частицы. Если вектор скорости частицы  $\mathbf{v}$  в однородном магнитном поле  $\mathbf{B}$  направлен перпен-



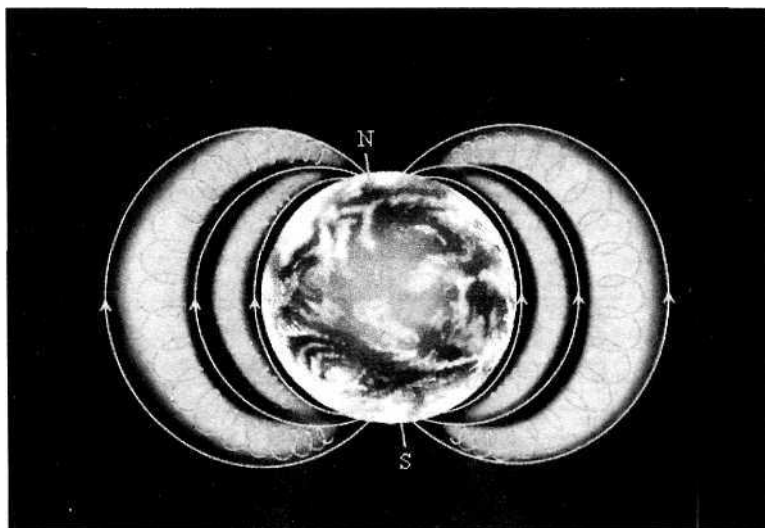


Рис. 2.3.7. Радиационные пояса Земли. Быстрые заряженные частицы от Солнца (в основном электроны и протоны) попадают в магнитные ловушки радиационных поясов. Частицы могут покидать пояса в полярных областях и вторгаться в верхние слои атмосферы, вызывая полярные сияния

дикулярно вектору магнитной индукции  $\mathbf{B}$ , то частица будет равномерно двигаться по окружности радиуса

$$R = mv/qB$$

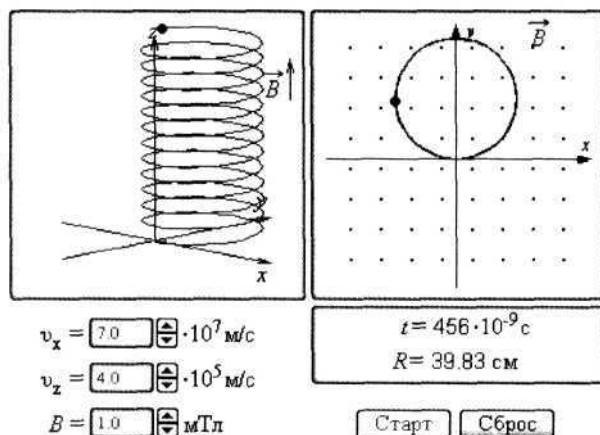
Если скорость частицы имеет составляющую, параллельную вектору  $\mathbf{B}$ , то частица будет двигаться по спирали.

Компьютерная модель иллюстрирует движение заряженной частицы в однородном магнитном поле. Можно изменять значения составляющих скорости частицы и индукцию магнитного поля. Программа позволяет вычислить радиус траектории и время одного цикла.

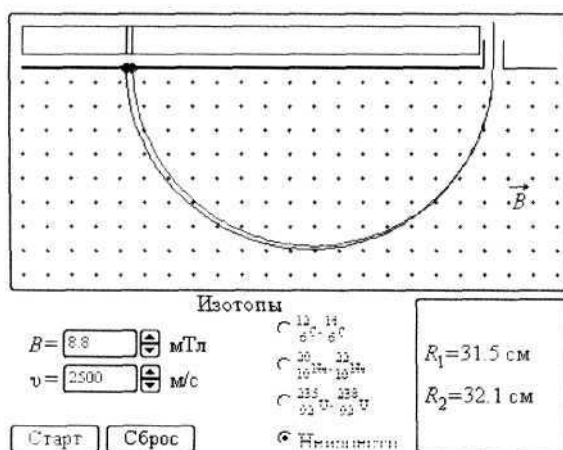
Обратите внимание, что сила Лоренца, действующая на движущуюся заряженную частицу, всегда перпендикулярна ее скорости.

**Масс-спектрометрами** называют устройства, с помощью которых можно измерять массы заряженных частиц, например, ядер различных атомов. Масс-спектрометры используются для разделения **изотопов**, то есть ядер атомов с одинаковым зарядом, но с разными массовыми числами, например,  ${}^{235}_{92}\text{U}$  и  ${}^{238}_{92}\text{U}$ .

В масс-спектрометрах заряженные частицы движутся в камере, в которой создан высокий вакуум, в однородном магнитном поле. Частицы влетают в



Модель. Движение заряда в магнитном поле



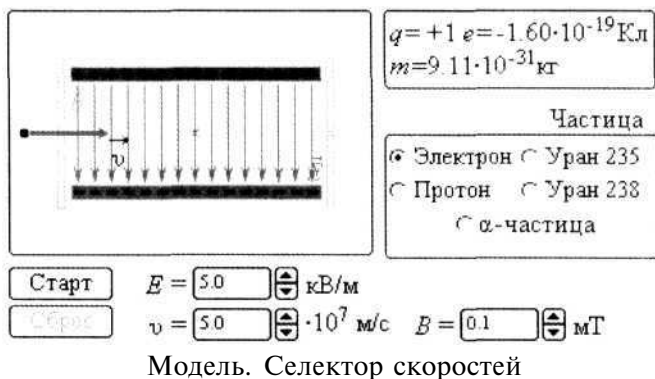
Модель. Масс-спектрометр

камеру, предварительно пролетев через **селектор скоростей**. Траектории частиц представляют собой дуги окружностей радиусов

$$R = \frac{m v}{q B}$$

Компьютерная модель позволяет изменять индукцию магнитного поля  $B$  и скорость частиц  $v$ . Опыт по разделению изотопов может быть выполнен для изотопов углерода, неона и урана, а также для изотопов неизвестного вещества.

В целом ряде устройств, например, в масс-спектрометрах, необходимо выполнить предварительную селекцию заряженных частиц по скоростям. Этой цели служат так называемые **селекторы скоростей**.



В простейшем селекторе скоростей заряженные частицы движутся в скрещенных однородных электрическом и магнитном полях. Электрическое поле создается между пластинами плоского конденсатора, магнитное – в зазоре электромагнита. Начальная скорость  $v$  заряженных частиц направлена перпендикулярно векторам  $E$  и  $B$ .

На заряженную частицу действуют две силы: электрическая сила  $qE$  и магнитная сила Лоренца  $qvB$ . При определенных условиях эти силы могут точно уравновешивать друг друга. В этом случае заряженная частица будет двигаться равномерно и прямолинейно. Пролетев через конденсатор, частица пройдет через небольшое отверстие в экране.

Условие прямолинейной траектории частицы не зависит от заряда и массы частицы, а зависит только от ее скорости:

$$qE = qvB \Rightarrow v = E/B$$

В компьютерной модели можно изменять значения напряженности электрического поля  $E$  индукции магнитного поля  $B$  и начальную скорость частиц  $v$ . Опыт по селекции скоростей можно выполнять для электрона, протона,  $\alpha$ -частицы и полностью ионизированных атомов урана 235 и урана 238.

## 2.4. Магнитное поле в веществе

Экспериментальные исследования показали, что все вещества в большей или меньшей степени обладают магнитными свойствами. Если два витка с токами поместить в какую-либо среду, то сила магнитного взаимодействия между токами изменяется. Этот опыт показывает, что индукция магнитного поля, создаваемого электрическими токами в веществе, отличается от индукции магнитного поля, создаваемого теми же токами в вакууме.

Физическая величина, показывающая, во сколько раз индукция  $B$  магнитного поля в однородной среде отличается по модулю от индукции  $B_0$  магнитного поля в вакууме, называется **магнитной проницаемостью**:

$$\mu = \frac{B}{B_0}$$

Магнитные свойства веществ определяются магнитными свойствами атомов или элементарных частиц (электронов, протонов и нейтронов), входящих в состав атомов. В настоящее время установлено, что магнитные свойства протонов и нейтронов почти в 1000 раз слабее магнитных свойств электронов. Поэтому магнитные свойства веществ в основном определяются электронами, входящими в состав атомов.

Одним из важнейших свойств электрона является наличие у него не только электрического, но и собственного магнитного поля. Собственное магнитное поле электрона называют **спиновым** (spin - вращение). Электрон создает магнитное поле также и за счет орбитального движения вокруг ядра, которое можно уподобить круговому микротоку. Спиновые поля электронов и магнитные поля, обусловленные их орбитальными движениями, и определяют широкий спектр магнитных свойств веществ.

Вещества крайне разнообразны по своим магнитным свойствам. У большинства веществ эти свойства выражены слабо. **Слабо-магнитные вещества** делятся на две большие группы -- **парамагнетики** и **диамагнетики**. Они отличаются тем, что при внесении во внешнее магнитное поле парамагнитные образцы намагничиваются так, что их собственное магнитное поле оказывается направленным по внешнему полю, а диамагнитные образцы намагничиваются против внешнего поля. Поэтому у парамагнетиков  $\mu > 1$ , а у диамагнетиков  $\mu < 0$ . Отличие  $\mu$  от единицы у пара- и диамагнетиков чрезвычайно мало. Например, у алюминия, который относится к парамагнетикам,  $\mu - 1 \sim 2,1 \cdot 10^{-5}$ , у хлористого железа ( $FeCl_3$ )  $\mu - 1 \sim 2,5 \cdot 10^{-3}$ . К парамагнетикам относятся также платина, воздух и многие другие вещества. К диамагнетикам относятся медь ( $\mu - 1 \sim -3 \cdot 10^{-6}$ ), вода ( $\mu - 1 \sim -9 \cdot 10^{-6}$ ), висмут ( $\mu - 1 \sim -1,7 \cdot 10^{-3}$ ) и другие вещества. Образцы из пара- и диамагнетика, помещенные в неоднородное магнитное поле между полюсами электромагнита, ведут себя по-разному — парамагнетики втягиваются в область сильного поля, диамагнетики — выталкиваются (рис.2.4.1).

Пара- и диамагнетизм объясняется поведением электронных орбит во внешнем магнитном поле. У атомов диамагнитных веществ в отсутствие внешнего поля собственные магнитные поля электронов и поля, создаваемые их орбитальным движением, полностью скомпенсированы. Возникновение диамагнетизма связано с действием силы Лоренца на электронные орбиты. Под действием этой силы изменяется характер орбитального движения электронов и нарушается компенсация магнитных полей. Возникающее при этом собственное магнитное поле атома оказывается направленным **против** индукции внешнего поля.

В атомах парамагнитных веществ магнитные поля электронов скомпенсированы не полностью, и атом оказывается подобным маленькому круговому току. В отсутствие внешнего поля эти круговые микротоки ориентированы

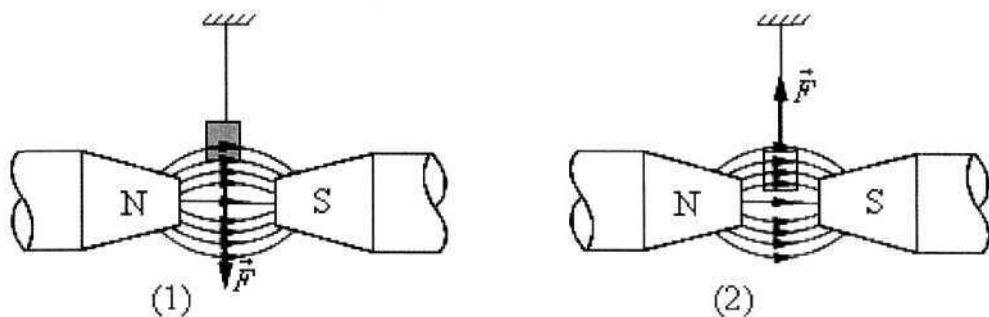


Рис. 2.4.1. Парамагнетик (1) и диамагнетик (2) в неоднородном магнитном поле

произвольно, так что суммарная магнитная индукция равна нулю. Внешнее магнитное поле оказывает ориентирующее действие — микротоки стремятся сориентироваться так, чтобы их собственные магнитные поля оказались направленными по индукции внешнего поля. Из-за теплового движения атомов ориентация микротоков никогда не бывает полной. При усилении внешнего поля ориентационный эффект возрастает, так что индукция собственного магнитного поля парамагнитного образца растет прямо пропорционально индукции внешнего магнитного поля. Полная индукция магнитного поля в образце складывается из индукции внешнего магнитного поля и индукции собственного магнитного поля, возникшего в процессе намагничивания. Механизм намагничивания парамагнетиков очень похож на механизм поляризации полярных диэлектриков. Диамагнетизм не имеет аналога среди электрических свойств вещества.

Следует отметить, что диамагнитными свойствами обладают атомы любых веществ. Однако, во многих случаях диамагнетизм атомов маскируется более сильным парамагнитным эффектом. Явление диамагнетизма было открыто М.Фарадеем (1845г.).

Вещества, способные сильно намагничиваться в магнитном поле, называются **ферромагнетиками**. Магнитная проницаемость ферромагнетиков по порядку величины лежит в пределах  $10^2$ - $10^5$ . Например, у стали ( $\mu \sim 8000$ , у сплава железа с никелем магнитная проницаемость достигает значений 250000.

К группе ферромагнетиков относятся четыре химических элемента: железо, никель, кобальт, гадолиний. Из них наибольшей магнитной проницаемостью обладает железо. Поэтому вся эта группа получила название ферромагнетиков.

Ферромагнетиками могут быть различные сплавы, содержащие ферромагнитные элементы. Широкое применение в технике получили керамические ферромагнитные материалы — ферриты.

Для каждого ферромагнетика существует определенная температура (так называемая *температура или точка Кюри*), выше которой ферромагнитные свойства исчезают, и вещество становится парамагнетиком. У железа, например, температура Кюри равна  $770^{\circ}\text{C}$ , у кобальта  $1130^{\circ}\text{C}$ , у никеля  $360^{\circ}\text{C}$ .

Ферромагнитные материалы делятся на две большие группы — на *магнито-мягкие* и *магнито-жесткие* материалы. Магнито-мягкие ферромагнитные материалы почти полностью размагничиваются, когда внешнее магнитное поле становится равным нулю. К магнито-мягким материалам относится, например, чистое железо, электротехническая сталь и некоторые сплавы. Эти материалы применяются в приборах переменного тока, в которых происходит непрерывное перемагничивание, то есть изменение направления магнитного поля (трансформаторы, электродвигатели и т.п.).

Магнито-жесткие материалы сохраняют в значительной мере свою намагниченность и после удаления их из магнитного поля. Примерами магнито-жестких материалов могут служить углеродистая сталь и ряд специальных сплавов. Магнито-жесткие материалы используются в основном для изготовления **постоянных магнитов**.

Магнитная проницаемость  $\mu$  ферромагнетиков **не является постоянной величиной**; она сильно зависит от индукции  $B_0$  внешнего поля. Типичная зависимость  $\mu(B_0)$  приведена на рис.2.4.2. В таблицах обычно приводятся значения максимальной магнитной проницаемости.

Непостоянство магнитной проницаемости приводит к сложной нелинейной зависимости индукции  $B$  магнитного поля в ферромагнетике от индукции  $B_0$  внешнего магнитного поля. Характерной особенностью процесса намагничивания ферромагнетиков является так называемый *гистерезис*, то есть зависимость намагничивания от предыстории образца. Кривая намагничивания  $B(B_0)$  ферромагнитного образца представляет собой петлю сложной формы, которая называется *петлей гистерезиса* (рис.2.4.3).

Из рис.2.4.3 видно, что при  $|B_0| > B_{0s}$  наступает магнитное насыщение — намагниченность образца достигает максимального значения.

Если теперь уменьшать магнитную индукцию  $B_0$  внешнего поля и довести ее вновь до нулевого значения, то ферромагнетик сохранит **остаточную намагниченность** — поле внутри образца будет равно  $B_r$ . Остаточная намагниченность образцов позволяет создавать постоянные магниты. Для того, чтобы полностью размагнитить образец, необходимо, изменив знак внешнего поля, довести магнитную индукцию  $B_0$  до значения  $-B_{0c}$ , которое принято называть **коэрцитивной силой**. Далее процесс перемагничивания может быть продолжен, как это указано стрелками на рис.2.4.3.

У магнито-мягких материалов значения коэрцитивной силы  $B_{0c}$  невелико — петля гистерезиса таких материалов достаточно "узкая". Материалы с большим значением коэрцитивной силы, то есть имеющие "широкую" петлю гистерезиса, относятся к магнито-жестким.

Природа ферромагнетизма может быть до конца понята только на основе квантовых представлений. Качественно ферромагнетизм объясняется наличием

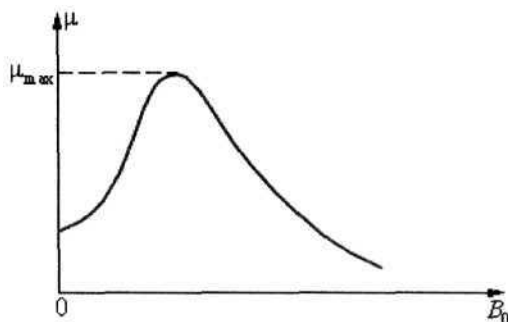


Рис. 2.4.2. Типичная зависимость магнитной проницаемости ферромагнетика от индукции внешнего магнитного поля

ем собственных (спиновых) магнитных полей у электронов. В кристаллах ферромагнитных материалов возникают условия, при которых, вследствие сильного взаимодействия спиновых магнитных полей соседних электронов, энергетически выгодной становится их параллельная ориентация. В результате такого взаимодействия внутри кристалла ферромагнетика возникают самопроизвольно намагниченные области размером порядка  $10^{-2} - 10^{-4}$  см. Эти области называются **доменами**. Каждый домен представляет из себя небольшой постоянный магнит.

В отсутствие внешнего магнитного поля  $\mathbf{B}$  направления векторов индукции магнитных полей в различных доменах ориентированы в большом кристалле хаотически. Такой кристалл в среднем окажется ненамагниченным. При

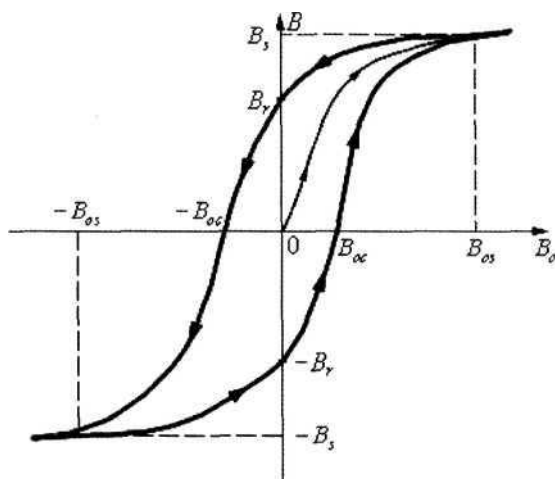


Рис. 2.4.3. Петля гистерезиса ферромагнетика. Стрелками указано направление процессов намагничивания и размагничивания ферромагнитного образца при изменении индукции  $B_0$  внешнего магнитного поля

наложении внешнего магнитного поля происходит смещение границ доменов так, что объем доменов, ориентированных по внешнему полю, увеличивается. С увеличением индукции внешнего поля возрастает магнитная индукция намагниченного вещества. В очень сильном внешнем поле домены, в которых собственное магнитное поле совпадает по направлению с внешним полем, поглощают все остальные домены, и наступает магнитное насыщение. Рис.2.4.4 может служить качественной иллюстрацией процесса намагничивания ферромагнитного образца.

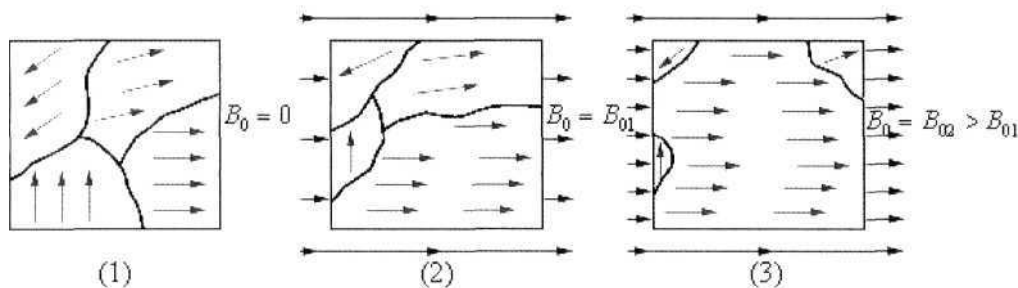


Рис. 2.4.4. Намагничивание ферромагнитного образца.

(1)  $B_0 = 0$ ; (2)  $B_0 = B_{01}$ ; (3)  $B_0 = B_{02} > B_{01}$

## 2.5. Электромагнитная индукция. Правило Ленца

Явление **электромагнитной индукции** было открыто выдающимся английским физиком М.Фарадеем в 1831г. Оно заключается в возникновении электрического тока в замкнутом проводящем контуре при изменении во времени **магнитного потока**, пронизывающего контур.

Магнитным потоком  $\Phi$  через площадь  $S$  контура называют величину

$$\Phi = B \cdot S \cdot \cos \alpha,$$

где  $B$  — модуль вектора магнитной индукции,  $\alpha$  — угол между вектором  $B$  и  $n$  нормалью к плоскости контура (рис.2.5.1).

Определение магнитного потока нетрудно обобщить на случай неоднородного магнитного поля и неплоского контура. Единица магнитного потока в системе СИ называется **вебером** (Вб). Магнитный поток, равный 1Вб, создается магнитным полем с индукцией 1Тл, пронизывающим по направлению нормали плоский контур площадью  $1\text{ м}^2$ :

$$1\text{Вб} = 1\text{Тл} \cdot 1\text{м}^2.$$



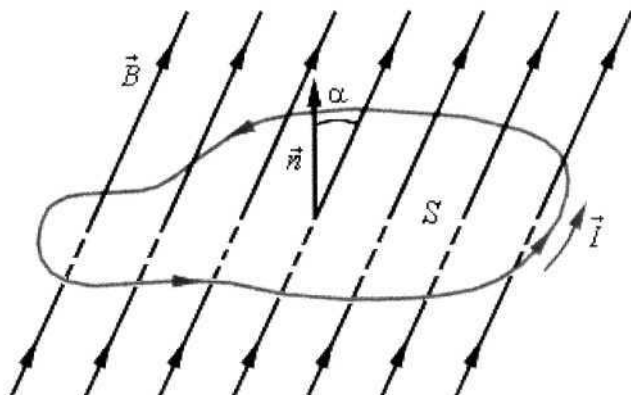


Рис. 2.5.1. Магнитный поток через замкнутый контур. Направление нормали и выбранное положительное направление обхода контура связаны правилом правого буравчика

Фарадей экспериментально установил, что при изменении магнитного потока в проводящем контуре возникает ЭДС индукции  $E_{\text{инд}}$ , равная скорости изменения магнитного потока через поверхность, ограниченную контуром, взятой со знаком минус:

$$E_{\text{инд}} = - \frac{\Delta \Phi}{\Delta t}$$

Опыт показывает, что индукционный ток, возбуждаемый в замкнутом контуре при изменении магнитного потока, всегда направлен так, что создаваемое им магнитное поле препятствует изменению магнитного потока, вызывающего индукционный ток. Это утверждение называется **правилом Ленца** (1833г.).

Рис.2.5.2 иллюстрирует правило Ленца на примере неподвижного проводящего контура, который находится в однородном магнитном поле, модуль индукции которого увеличивается во времени.

Правило Ленца отражает тот экспериментальный факт, что  $E_{\text{инд}}$  и  $\frac{\Delta \Phi}{\Delta t}$  всегда имеют противоположные знаки (знак "минус" в формуле Фарадея). Правило Ленца имеет глубокий физический смысл - оно выражает закон сохранения энергии.

Изменение магнитного потока, пронизывающего замкнутый контур, может происходить по двум причинам.

1. Магнитный поток изменяется вследствие перемещения контура или его частей в постоянном во времени магнитном поле. Это случай, когда проводники, а вместе с ними и свободные носители заряда, движутся в магнитном поле. Возникновение ЭДС индукции объясняется действием силы Лоренца на

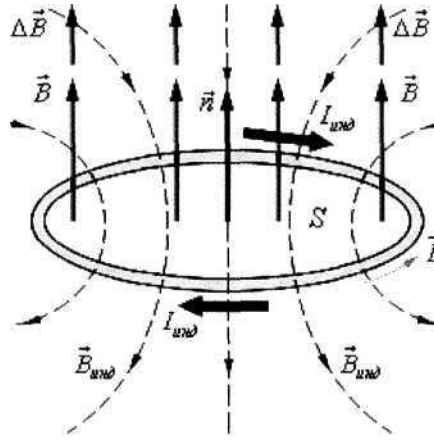


Рис. 2.5.2. Иллюстрация правила Ленца. В этом примере  $\frac{\Delta\Phi}{\Delta t} > 0$ , а  $E_{\text{инд}} < 0$ .

Индукционный ток  $I_{\text{инд}}$  течет навстречу выбранному положительному направлению обхода контура

свободные заряды в движущихся проводниках. Сила Лоренца играет в этом случае роль сторонней силы.

Рассмотрим в качестве примера возникновение ЭДС индукции в прямоугольном контуре, помещенном в однородное магнитное поле  $\mathbf{B}$  перпендикулярное плоскости контура. Пусть одна из сторон контура длиной  $l$  скользит со скоростью  $v$  по двум другим сторонам (рис.2.5.3).

На свободные заряды на этом участке контура действует сила Лоренца. Одна из составляющих этой силы, связанная с **переносной** скоростью зарядов, направлена вдоль проводника. Эта составляющая указана на рис.2.5.3. Она играет роль сторонней силы. Ее модуль равен

$$F_{\text{Л}} = evB$$

Работа силы  $F_{\text{Л}}$  на пути  $l$  равна

$$A = F_{\text{Л}} \cdot l = evBl.$$

По определению ЭДС

$$E_{\text{инд}} = \frac{A}{e} = vBl.$$

В других неподвижных частях контура сторонняя сила равна нулю. Соотношению для  $E_{\text{инд}}$  можно придать привычный вид. За время  $\Delta t$  площадь

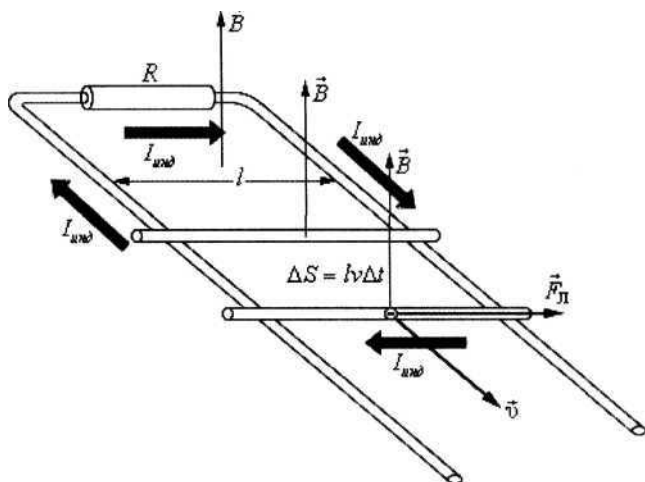


Рис. 2.5.3. Возникновение ЭДС индукции в движущемся проводнике. Указана составляющая силы Лоренца, действующей на свободный электрон

контура изменяется на  $\Delta S = lv\Delta t$ . Изменение магнитного потока за это время равно  $\Delta\Phi = Blv\Delta t$ . Следовательно,

$$|E_{\text{инд}}| = \left| \frac{\Delta\Phi}{\Delta t} \right|$$

$\Delta\Phi$

Для того, чтобы установить знак в формуле, связывающей  $E_{\text{инд}}$  и -----

$\Delta t$

нужно выбрать согласованные между собой по правилу правого буравчика направление нормали  $\mathbf{n}$  и положительное направление обхода контура  $l$  как это сделано на рис.2.5.1 и 2.5.2. Если это сделать, то легко прийти к формуле Фарадея.

Если сопротивление всей цепи равно  $R$ , то по ней будет протекать индукционный ток, равный  $I_{\text{инд}} = E_{\text{инд}}/R$ . За время  $\Delta t$  на сопротивлении  $R$  выделится джоулево тепло (см. 1.11)

$$\Delta Q = RI_{\text{инд}}^2 \Delta t = \frac{v^2 B^2 l^2}{R} \Delta t.$$

Возникает вопрос: откуда берется эта энергия, ведь сила Лоренца работы не совершает! Этот парадокс возник потому, что мы учли работу только одной составляющей силы Лоренца. При протекании индукционного тока по проводнику, находящемуся в магнитном поле, на свободные заряды действует еще одна составляющая силы Лоренца, связанная с **относительной** скоростью

движения зарядов вдоль проводника. Эта составляющая ответственна за появление силы Ампера  $F_A$ . Для случая, изображенного на рис. 1.20.3, модуль силы Ампера равен  $F_A = IBl$ . Сила Ампера направлена навстречу движения проводника; поэтому она совершает отрицательную механическую работу. За время  $\Delta t$  эта работа  $A_{\text{мех}}$  равна

$$A_{\text{мех}} = -Fv\Delta t = -IBlv\Delta t = -\frac{v^2 B_2 l^2}{R} \Delta t.$$

Движущийся в магнитном поле проводник, по которому протекает индукционный ток, испытывает *магнитное торможение*. **Полная работа силы Лоренца равна нулю.** Джоулево тепло в контуре выделяется либо за счет работы внешней силы, которая поддерживает скорость проводника неизменной, либо за счет уменьшения кинетической энергии проводника.

2. Вторая причина изменения магнитного потока, пронизывающего контур, — изменение во времени магнитного поля при неподвижном контуре. В этом случае возникновение ЭДС индукции уже нельзя объяснить действием силы Лоренца. Электроны в неподвижном проводнике могут приводиться в движение только электрическим полем. Это электрическое поле порождается изменяющимся во времени магнитным полем. Работа этого поля при перемещении единичного положительного заряда по замкнутому контуру равна ЭДС индукции в неподвижном проводнике. Следовательно, электрическое поле, порожденное изменяющимся магнитным полем, не **является потенциальным**. Его называют *вихревым электрическим полем*. Представление о вихревом электрическом поле было введено в физику великим английским физиком Дж.Максвеллом (1861г.).

Явление электромагнитной индукции в неподвижных проводниках, возникающее при изменении окружающего магнитного поля, также описывается формулой Фарадея. Таким образом, явления индукции в движущихся и неподвижных проводниках **протекают одинаково**, но физическая причина возникновения индукционного тока оказывается в этих двух случаях различной: в случае движущихся проводников ЭДС индукции обусловлена силой Лоренца; в случае неподвижных проводников ЭДС индукции является следствием действия на свободные заряды вихревого электрического поля, возникающего при изменении магнитного поля.

Согласно закону электромагнитной индукции, открытому Фарадеем, ЭДС индукции в замкнутом контуре равна скорости изменения магнитного потока  $\Phi$ , пронизывающего контур, взятой со знаком минус:

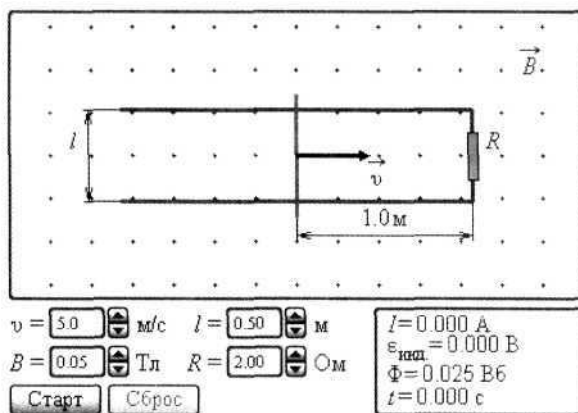
$$E_{\text{инд}} = -\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}.$$

Компьютерная модель является иллюстрацией закона электромагнитной индукции для случая, когда изменение магнитного потока вызывается переме-

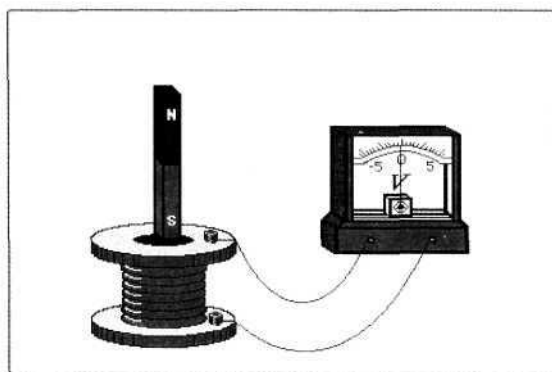
щением участка проводящего контура в однородном и неизменном во времени магнитном поле. Возникновение ЭДС индукции объясняется в этом случае действием силы Лоренца на электроны в движущемся проводнике.

В компьютерной модели можно изменять индукцию магнитного поля  $B$ , скорость проводника — сопротивление цепи  $R$  и длину  $l$  движущегося проводника. На дисплее высвечиваются для любого момента времени значения  $E_{\text{инд}}$ , индукционный ток  $I$ , магнитный поток  $\Phi$ .

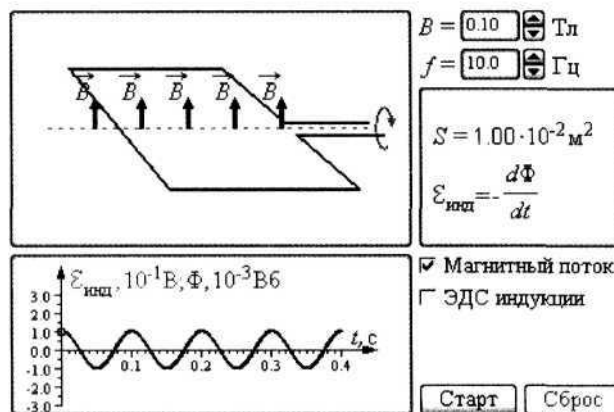
Опыты Фарадея, выполненные в 30-е годы XIX века, демонстрируют возникновение электрического тока в замкнутом проводящем контуре (цепь индикаторной катушки) при изменении магнитного потока. Модель является компьютерной иллюстрацией опытов Фарадея. В этих опытах магнитное поле можно создаваться либо постоянным магнитом, либо катушкой с током. Изменение магнитного потока, пронизывающего индикаторную катушку, достига-



Модель. Электромагнитная индукция



Модель. Опыты Фарадея



Модель. Генератор переменного тока

ется перемещением источника магнитного поля или самой катушки. Обратите внимание, что явление электромагнитной индукции в обоих случаях протекает одинаково. Магнитный поток, пронизывающий индикаторную катушку, изменяется при включении или выключении тока в первичной катушке, создающей магнитное поле. В этом случае в цепи индикаторной катушки также протекает короткий импульс тока.

Все манипуляции проводятся на дисплее с помощью мыши.

Если плоская рамка площади  $S$  равномерно вращается с частотой/оборотов в секунду в однородном магнитном поле с индукцией  $B$  то магнитный поток  $\Phi$ , пронизывающий рамку периодически изменяется во времени:

$$\Phi(t) = B \cdot S \cos(2\pi ft) .$$

В соответствии с законом электромагнитной индукции Фарадея на концах рамки появится переменное напряжение

$$E_{\text{инд}} = -2\pi f B S \sin(2\pi ft) .$$

Амплитуда этого напряжения пропорциональна скорости вращения рамки. Такая рамка, вращающаяся в магнитном поле, является моделью генератора переменного тока.

В компьютерной модели можно изменять индукцию магнитного поля  $B$ , частоту вращения рамки  $f$  и ее площадь  $S$ . На экране дисплея можно наблюдать периодические изменения магнитного потока  $\Phi$  и ЭДС индукции  $E_{\text{инд}}(t)$ . Обратите внимание, что изменение ЭДС индукции отстает от изменения магнитного потока по фазе на угол  $\pi/2$ .

## 2.6. Самоиндукция. Энергия магнитного поля

**Самоиндукция** является важным частным случаем электромагнитной индукции, когда изменяющийся магнитный поток, вызывающий ЭДС индукции, создается током в самом контуре. Если ток в рассматриваемом контуре по каким-то причинам изменяется, то изменяется и магнитное поле этого тока, а, следовательно, и собственный магнитный поток, пронизывающий контур. В контуре возникает ЭДС самоиндукции, которая согласно правилу Ленца препятствует изменению тока в контуре.

Собственный магнитный поток  $\Phi$ , пронизывающий контур или катушку с током, пропорционален силе тока  $I$ :

$$\Phi = LI.$$

Коэффициент пропорциональности  $L$  в этой формуле называется **коэффициентом самоиндукции** или **индуктивностью** катушки. Единица индуктивности в СИ называется **генри** (Гн). Индуктивность контура или катушки равна 1Гн, если при силе постоянного тока 1А собственный поток равен 1Вб:

$$1\text{Гн} = 1\text{Вб}/\text{А}.$$

В качестве примера рассчитаем индуктивность длинного соленоида, имеющего  $N$  витков, площадь сечения  $S$  и длину  $l$ . Магнитное поле соленоида определяется формулой (см. 1.17)

$$B = \mu_0 In,$$

где  $I$  — ток в соленоиде,  $n=N/l$  — число витков на единицу длины соленоида. Магнитный поток, пронизывающий все  $N$  витков соленоида, равен

$$\Phi = B \cdot S \cdot N = \mu_0 n^2 S l I.$$

Следовательно, индуктивность соленоида равна

$$L = \mu_0 n^2 S l = \mu_0 n^2 V,$$

где  $V = S l$  — объем соленоида, в котором сосредоточено магнитное поле. Полученный результат не учитывает краевых эффектов, поэтому он приближенно справедлив только для достаточно длинных катушек. Если соленоид заполнен веществом с магнитной проницаемостью  $\mu$ , то при заданном токе  $I$  индукция магнитного поля возрастает по модулю в  $\mu$  раз, поэтому индуктивность катушки с сердечником также увеличивается в  $\mu$  раз:

$$L_\mu = \mu L = \mu \mu_0 n^2 V.$$

**ЭДС самоиндукции**, возникающая в катушке с постоянным значением индуктивности, согласно формуле Фарадея равна

$$E_{\text{инд}} = E_L = -\frac{\Delta\Phi}{\Delta t} = -L\frac{\Delta I}{\Delta t}.$$

ЭДС самоиндукции прямо пропорциональна индуктивности катушки и скорости изменения силы тока в ней.

Магнитное поле обладает энергией. Подобно тому, как в заряженном конденсаторе имеется запас электрической энергии, в катушке, по виткам которой протекает ток, имеется запас магнитной энергии. Если включить электрическую лампу параллельно катушке с большой индуктивностью в электрическую цепь постоянного тока, то при размыкании ключа наблюдается кратковременная вспышка лампы (рис.2.6.1). Ток в цепи возникает под действием ЭДС самоиндукции. Источником энергии, выделяющейся при этом в электрической цепи, является магнитное поле катушки.

Из закона сохранения энергии следует, что вся энергия, запасенная в катушке, выделится в виде джоулева тепла. Если обозначить через  $R$  полное сопротивление цепи, то за время  $\Delta t$  выделится количество теплоты  $\Delta Q = I^2 R \Delta t$ .

Ток в цепи равен

$$I = \frac{E_L}{R} = -\frac{L \Delta I}{R \Delta t}$$

Выражение для  $\Delta Q$  можно записать в виде

$$\Delta Q = -LI\Delta I = -\Phi(I)\Delta I.$$

В этом выражении  $\Delta I < 0$ ; ток в цепи постепенно убывает от первоначального значения  $I_0$  до нуля. Полное количество теплоты, выделившейся в цепи, можно получить, выполнив операцию интегрирования в пределах от  $I_0$  до 0. Это дает

$$Q = \frac{LI_0^2}{2}.$$

Эту формулу можно получить графическим методом, изобразив на графике зависимость магнитного потока  $\Phi(I)$  от тока  $I$  (рис.2.6.2). Полное количество выделившейся теплоты, равное первоначальному запасу энергии магнитного поля, определяется площадью изображенного на рис.2.6.2 треугольника.

Таким образом, энергия  $W_M$  магнитного поля катушки с индуктивностью  $L$ , создаваемого током  $I$ , равна



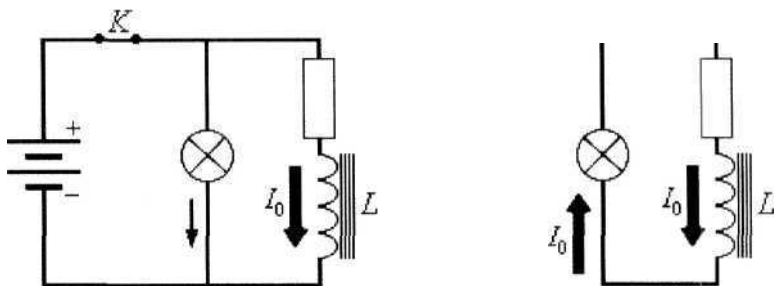


Рис. 2.6.1. Магнитная энергия катушки. При размыкании ключа К лампа ярко вспыхивает

$$W_M = \frac{\Phi I}{2} = \frac{LI^2}{2} = \frac{\Phi I}{2L}.$$

Применим полученное выражение для энергии катушки к длинному соленоиду с магнитным сердечником. Используя приведенные выше формулы для коэффициента самоиндукции  $L$  соленоида и для магнитного поля  $B$ , создаваемого током  $I$ , можно получить:

$$W_M = \frac{\mu_0 \mu n^2 I^2}{2} V = \frac{B^2}{2\mu_0 \mu} V,$$

где  $V$  — объем соленоида. Это выражение показывает, что магнитная энергия локализована не в витках катушки, по которым протекает ток, а рассредоточена по всему объему, в котором создано магнитное поле. Физическая величина

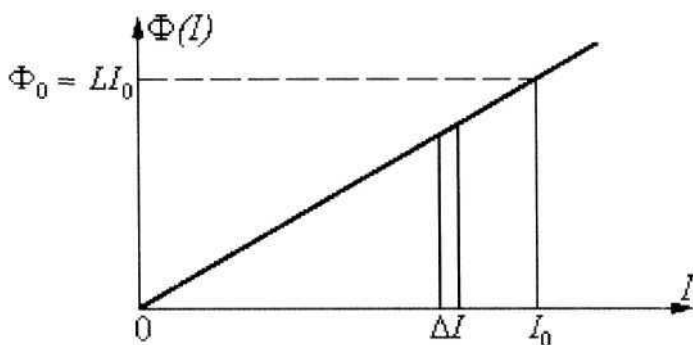


Рис. 2.6.2. Вычисление энергии магнитного поля

$$w_M = \frac{B^2}{2\mu_0\mu} V,$$

равная энергии магнитного поля в единице объема, называется объемной плотностью магнитной энергии. Дж.Максвелл показал, что выражение для объемной плотности магнитной энергии, выведенное здесь для случая длинного соленоида, справедливо для любых магнитных полей.

## Глава 3.

# ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ И МЕТОДЫ ПОЛУЧЕНИЯ МАГНИТНОГО ПОЛЯ

### Введение

Развитие науки немыслимо без проведения экспериментальных исследований. Получаемые при этом опытные факты ценны главным образом тем, что приводят к открытию новых, не предсказанных ранее явлений. На их основе появляется возможность создавать приборы, работающие на новых принципах. Последние оказываются либо более чувствительными и позволяют глубже и шире исследовать уже известную область науки, либо вооружают ученых для поиска новых явлений. Открытие явления, исследование его, изобретение на его основе прибора и дальнейшие исследования с помощью нового прибора — этапы построения здания науки об окружающем материальном мире.

В самом общем виде можно сказать, что в науке для познания Природы используются в качестве инструментов различного рода взаимодействия и поля. Воздействуя на вещество тем или иным полем, изучают отклик вещества на это воздействие. Анализируя его, делают заключение о природе явления. Наиболее эффективным средством воздействия является магнитное поле, так как магнетизм — широко распространенное свойство веществ.

Цель настоящей работы — дать качественное описание наиболее распространенных методов получения магнитных полей. Большая часть этих методов является результатом развития научных знаний и достижений техники последних десятилетий. При этом они бурно развиваются и в настоящее время, так как потребность в них велика в силу ощущения открытия новых горизонтов для развития как научных знаний, так и техники.

Хотя магнетизм был известен человеку с древних времен, магнитное поле становится инструментом научных исследований только после открытия датским физиком Эрстедом в 1820 году связи между током и магнитным полем: электрический ток порождает магнитное поле. Это дало начало новому разделу физики — электромагнетизму. Металлический провод с током, свернутый в катушку (соленоид), вскоре после этого открытия и был первым генератором постоянного магнитного поля. Техника этого времени и долгое время после не позволяла получить сколько-нибудь сильные магнитные поля с помощью соленоидов, и основным устройством для этого был электромагнит — система из железного сердечника, помещенного в магнитное поле соленоида. Железо усиливает поле соленоида в сотни раз. Но поле электромагнита ограничено по величине практическими пределами. Поэтому с середины двадцатых годов

нашего столетия более сильные магнитные поля стали получать с помощью специальных соленоидов, используя при этом весь накопленный арсенал достижений науки и техники.

### 3.1. Электромагниты

Электромагниты до сих пор не утратили своего значения и широко применяются в науке и технике. Это связано со сравнительной простотой и дешевизной получения стационарных постоянных полей, пригодных для многих научных задач.

Рассмотрим простейшее устройство: многovitkovую и многослойную катушку, намотанную на круглый сердечник, выполненный в виде замкнутого кольца. Положим, что размеры сечения ферромагнетика существенно меньше размеров кольца. По катушке течет ток  $I$ . Он создает поле  $H = 0,4\pi nI$ , где  $n$  - плотность числа витков обмотки на 1 см. Это поле наводит в ферромагнетике дополнительное поле  $H_\phi$ . Суммарное поле (магнитная индукция)  $B = H + H_\phi$ .

Для качественного описания работы электромагнита можно допустить, что до некоторого значения  $H = H_{нас}$  величина  $H_\phi$  существенно и линейно зависит от  $H$ , а в больших полях практически не зависит от него (ферромагнетик насыщается). Тогда при  $H < H_{нас} < \sigma = \mu H$ , где  $\mu$  — магнитная проницаемость. Видно, что в полях соленоида, больших  $H_{нас}$ , прирост магнитного поля  $B$  возможен лишь за счет поля соленоида.

Практически для технически чистого железа (мягкие стали) величина  $\mu \sim 100$ , а  $\sigma_{нас} \sim \mu H_{нас}$  около  $2 \cdot 10^4$  Э. Ряд сплавов обладает несколько большим значением  $B_{нас}$ . Так, пермендюр (сплав 50% Fe + 50% Co) имеет  $B_{нас} = 2,4 \cdot 10^4$  Э. Еще большее значение  $B_{нас} \sim 3 \cdot 10^4$  Э имеет поликристаллический диспрозий, но он редко применяется, так как ферромагнитные свойства проявляются в нем ниже комнатных температур. Поэтому основным материалом для изготовления электромагнитов является железо.

Для того чтобы использовать поле  $B$ , необходимо ферромагнетик разомкнуть. Тогда поле  $H_0$  в образовавшемся пространстве щели, если расстояние  $d$  между торцами  $d \ll D$  (где  $D$  — диаметр сечения щели), будет совпадать с  $B$ ,  $H_0 \sim B$ . При увеличении  $d$  величина  $H_0$  будет уменьшаться из-за неизбежного рассеяния магнитного потока в пространстве. В общем случае  $H_0 < B < B_{нас}$ .

Практически электромагниты делают из двух железных цилиндров (полюса) радиуса  $r$ , на которые насажены короткие катушки; максимальное поле катушек обычно не превышает 500-1000 Э. Полюсы плотно вставляются в железное ярмо, замыкающее магнитный поток. Между оставшимися свободными торцами, расстояние между которыми  $d$ , образуется межполюсное рабочее пространство с размерами  $d, 2r$  (рис. 3.1.1, а). Максимальное поле в нем достигается в центре и дается выражением,

$$H_0 = B_{cp}(1 - \cos\theta) \quad (1)$$

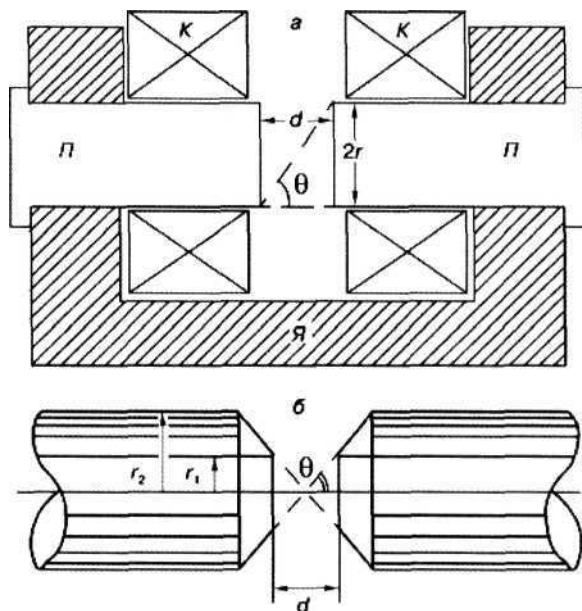


Рис. 3.1 1. а — Схема электромагнита: к — катушки, п — полюсы, я — ярмо  
б — Конусные полюсные наконечники

где  $B_{cp}$  — некоторое усредненное по поверхности торцов поле,  $B_{cp} < B < B_{нас}$ .

На первый взгляд кажется, что получить поле  $H_0$ , большее  $B_{нас}$ , варьируя  $d$  и  $r$ , нельзя. Это действительно так для рассмотренной формы полюсов и их окончаний в межполюсном пространстве (полюсные наконечники). В общем случае за счет другой формы полюсов и особенно формы полюсных наконечников поле  $H_0$  может существенно превосходить поле  $B_{нас}$ . Практически это может происходить лишь за счет наращивания массы железа.

Рассмотрим частный случай полюсов и полюсных наконечников, изображенных на рис. 3.1.1.6. Точное выражение для этого случая:

$$H_0 = B_{cp}(1 - \cos\theta + lh \frac{r_2^2}{r_1} \cos\theta \sin^2\theta). \quad (2)$$

Здесь третий член представляет дополнительный вклад в  $H_0$  от того объема полюсов, который образуют конусные поверхности полюсных наконечников. Именно конусность позволяет послать дополнительные силовые линии в центр межполюсного пространства. Третий член при определенном угле достигает максимума. Его значение примерно  $55^{\text{circ}}$ . Поэтому часто полюсные наконечники выполняются в виде усеченных конусов с углом раствора порядка  $110^{\text{circ}} - 220^{\text{circ}}$ . Размер  $r_1$  определяет объем межполюсного пространства, в то время как  $r_2$  — объем всего магнита, так как площадь сечения ярма не может

быть меньше, чем у полюсов. Увеличивая  $r_2$ , то есть наращивая объем железа, можно увеличить  $H_0$  и превысить значение  $B_{нас}$ . Но зависимость  $H_0$  от  $r_2$  довольно слабая, что приводит к практическим ограничениям (приемлемые размеры и вес) достижения больших полей с помощью электромагнитов.

Рекордные величины  $H_0$  были получены на двух электромагнитах. Один из них был сконструирован в начале 30-х годов нашего столетия в Парижской Академии наук. Его общий вес (главным образом железа) около 150 тонн, габариты  $6 \times 3 \times 2 \text{ м}^3$ , потребляемая мощность 100 кВт. В центре межполюсного пространства ( $r_1 = 1 \text{ см}$ ,  $d = 1 \text{ см}$ ) он давал поле  $H_0 = 6,5 \cdot 10^4 \text{ Э}$ . Другой магнит был сконструирован в Университете г. Упсала (Швеция) в 1934 году. Его общий вес - 37 тонн. За счет лучшей формы полюсов, а также ярма - толстостенного цилиндра, внутри которого размещались полюсы и катушки, при меньшем весе удалось получить большее поле  $H_0 = 7,5 \cdot 10^4 \text{ Э}$  в таком же объеме, что и у первого магнита. Рядовые же лабораторные электромагниты дают возможность получать максимальные поля до  $3 \cdot 10^4 \text{ Э}$ , потребляя при этом скромную мощность в 1-5 кВт.

Любопытно отметить, что самым грандиозным из электромагнитов (а может быть, вообще изделий из железа) является магнит синхрофазотрона Объединенного института ядерных исследований в Дубне. Вес его ярма — 30 тыс. тонн. В тороидальном объеме межполюсного пространства (диаметр кольца 150 м и диаметр сечения около 2 м) он создает поле порядка  $2 \cdot 10^4 \text{ Э}$ .

### 3.2. Соленоиды

Из предыдущего видно, что получить с помощью электромагнита поле, большее, скажем,  $10^5 \text{ Э}$ , практически невозможно. Дальнейший путь увеличения поля — использование соленоидов без ферромагнетика. В соленоидах поле генерируется только за счет протекающего тока, и максимально достижимые магнитные поля зависят от величины мощности, которую можно "загнать" в соленоид.

Соленоиды бывают различных типов: многovitковые многослойные катушки, спирали плоские и геликоидальные, набранные из дисков и цельноточенные из металлических прутков, одновитковые и др. По своему значению они делятся на два больших класса: соленоиды для получения стационарных магнитных полей, то есть таких полей, которые могут по желанию экспериментатора долго держаться при определенных фиксированных значениях, и соленоиды для получения импульсных магнитных полей, существование которых возможно лишь в течение короткого времени (в общем случае не более 1 секунды). С помощью соленоидов первого типа генерируются поля до  $2,5 \cdot 10^5 \text{ Э}$ . Импульсные соленоиды позволяют получить поля до  $5 \cdot 10^6 \text{ Э}$ .

Принято поля в диапазоне  $10^5$ - $10^6 \text{ Э}$  называть сильными, а свыше  $10^6 \text{ Э}$  - сверхсильными. Если во время получения поля соленоиды не деформиру-

ются и не сильно нагреваются, то поле в них пропорционально протекающему току:  $H = kI$ , где  $k$  — константа соленоида, которая поддается точному расчету.

Рассмотрим сначала соленоиды стационарного магнитного поля. Они делятся, в свою очередь, на резистивные и сверхпроводящие.

Резистивные соленоиды изготавливаются из материалов, имеющих электрическое сопротивление. Поэтому вся подводимая к ним непрерывно энергия диссипируется в тепло. Во избежание теплового разрушения соленоида это тепло необходимо отводить. Для отвода тепла используется водяное или криогенное охлаждение, что требует дополнительной энергии, подчас сравнимой с той, что необходима для питания самого соленоида.

Сверхпроводящие соленоиды изготавливаются из сверхпроводящих сплавов, электрическое сопротивление которых остается равным нулю при температурах и полях проведения эксперимента. При работе сверхпроводящего соленоида энергия выделяется лишь в подводящих проводах и источнике тока. Последнее вообще может быть исключено, если соленоид работает в короткозамкнутом режиме, когда поле без потребления энергии может существовать сколь угодно долго при сохранении условий существования сверхпроводимости.

Установки для получения сильных магнитных полей состоят из трех основных частей: источника постоянного тока, соленоида и системы охлаждения. При конструировании соленоида исходят из величины его внутреннего канала  $d$ , приемлемого для проведения опытов, и имеющейся мощности источника тока  $W$ . Обычно значение  $d$  порядка 3–5 см. Встает вопрос, как при этих заданных параметрах получить максимальное поле. Эта задача решается точно. Рассмотрим два практически важных случая. Пусть соленоид намотан проводом, тонким по сравнению с размерами круглого каркаса, который имеет прямоугольное осевое сечение. В этом случае ток будет равномерно распределен по всему сечению обмотки. Поле в центре рабочего канала соленоида дается выражением

$$H_0 = g \left( \frac{2W\lambda}{pd} \right)^{1/2}, \quad (3)$$

где  $\lambda$  — коэффициент заполнения, равный отношению объема металлического проводника обмотки к объему, занимаемому всей обмоткой ( $\lambda < 1$ ),  $p$  — удельное сопротивление проводника в Ом·см,  $g$  — коэффициент, зависящий лишь от геометрии осевого сечения объема обмотки, то есть от относительных размеров  $\alpha = D/d$  и  $\beta = l/d$ , где  $D$  — внешний диаметр, а  $l$  — длина соленоида. Максимальное значение  $g = 0,18$  достигается при  $\alpha = 3$ ,  $\beta = 2$ . При любых других значениях  $\alpha$  и  $\beta$  (и прочих равных условиях) магнитное поле будет меньше.

Другая конструкция соленоида дает возможность более эффективно использовать имеющуюся мощность, то есть получить большее поле при той же мощности и величине  $d$ . Он изготавливается из тонких, обычно медных дисков,

разрезанных один раз по радиусу. Диски электрически соединяются внахлест частью своей площади друг с другом, образуя геликоидальную спираль. Между дисками располагается изоляция. Кроме того, диски по многим радиусам имеют круглые или щелевые отверстия, которые при сборке соленоида образуют вдоль его оси сквозные каналы для прокачки охлаждающей жидкости. Начало применению таких соленоидов было положено Френсисом Биттером в конце 30-х годов нашего столетия в США, и поэтому они называются биттеровскими соленоидами. Легко видеть, что ток в биттеровском соленоиде распределен по диску неравномерно: плотность тока  $j$  падает от максимального значения  $j_0$  на внутренней части диска с диаметром  $d$  к периферии по закону

$$= j_0 \frac{d}{2r}, \quad D \geq 2r \geq d.$$

Решение задачи на максимум поля приводит также к формуле (3), а фактор  $g$  достигает максимального значения  $g = 0,21$  при  $\alpha=6$ ,  $\beta=2$  то есть соленоид еще больше сплюснут.

Есть и другие конструкции, в которых  $g$  достигает больших значений. Поэтому была решена и общая задача о нахождении такой геометрии соленоида и распределения тока в нем, при которых достигалось бы предельно максимальное значение  $g$ . Ответ:  $g = 0,27$ . Но эта величина скорее служит ориентиром для оценок, так как практическая реализация такого соленоида невозможна, поскольку найденное значение достигается при  $\alpha, \beta \rightarrow \infty$  и при довольно сложном распределении плотности тока  $j$  по обмотке.

Обратимся к выражению (3). Можно подсчитать, что для соленоида из меди поле порядка  $10^5$  Э достигается при мощности порядка 1 МВт.  $p \sim 2 \cdot 10^6$  Ом см,  $\lambda \sim 1$ ,  $d \sim 1$  см). В 1939 году такая величина поля впервые была достигнута в биттеровском соленоиде. Успех пришел после того, как через маленький объем каналов соленоида удалось прокачивать несколько кубометров охлаждающей воды в минуту.

Для водоохлаждаемых соленоидов биттеровского типа дальнейшее увеличение максимального поля  $H_0$  возможно лишь за счет увеличения мощности источника тока. Но при этом должен возрастать перегрев соленоида относительно охлаждающей жидкости. Это ограничивает максимально достижимую величину  $H_0$  для соленоидов стационарного поля: тепловыделение приводит к пленочному кипению охлаждающей жидкости (образование паровой прослойки между металлом и жидкостью), резкому снижению теплосъема и катастрофическому повышению температуры соленоида. Для воды это происходит при потоке мощности около 2000 Вт/см. Зная оптимальную площадь охлаждения соленоида, можно подсчитать максимально снимаемую мощность. Подсчеты дают (при  $d = 3$  см) примерно 10 МВт и поле около  $2 \cdot 10^5$  Э.

Если же уменьшить время работы соленоида так, что соленоид не успеет расплавиться, то максимальное поле будет ограничиваться другим фактором - прочностью соленоида. Электромагнитное взаимодействие токов приводит



к двум силам. Одна из них — осевая — сжимает соленоид, другая — тангенциальная -- растягивает по радиусу. Они могут привести к пластическому течению материала соленоида и к обрыву обмотки. Для чистой меди предел по механической прочности достигается при  $P \sim 2 \cdot 10^5$  Э. Для материалов типа бронзы и стали он в несколько раз больше  $H$  (до  $7 \cdot 10^5$  Э). Это используется для генерации импульсных магнитных полей (см. далее).

Создание установки с резистивным соленоидом для генерации стационарных полей — большая научно-техническая задача. Поэтому во всем мире имеется лишь около десяти лабораторий с такими установками (США, Франция, Польша, Япония, Россия). Используются соленоиды разных конструкций, работа которых происходит вблизи теплового предела. Эксплуатация соленоидов требует высококвалифицированного персонала и обходится недешево. Львиная доля расходов идет на оплату электроэнергии. Существование и работа таких соленоидов окупается тем, что здесь исследователи из разных областей физики, приглашаемые из других стран, получают важные научные результаты.

Обратимся теперь к сверхпроводящим соленоидам. Как это часто бывает, когда в какой-либо области техники после долгого и трудного пути решается сложная и важная задача, оказывается, что этого же результата можно достичь более простым, экономичным и эффективным методом. Пример тому — получение сильных стационарных полей с помощью сверхпроводящих соленоидов. Из многих замечательных свойств явления сверхпроводимости используется основное: отсутствие ниже определенной характерной температуры  $T_c$  (критическая температура) электрического сопротивления у ряда металлов и сплавов. Явление сверхпроводимости было открыто в 1911 году голландским физиком Камерлинг-Оннесом в образцах ртути при  $T = 4$  К. При температуре кипения жидкого гелия сверхпроводимостью обладают также свинец  $Pb$  ( $T_c = 7,2$  К) и ниобий  $Nb$  ( $T_c = 9$  К). Это наивысшие значения  $T_c$  для элементов.

Сверхпроводимость позволяет изготавливать соленоиды, в которых не происходит диссипация энергии при протекании тока. Но получаемое при этом поле ограничивается тем обстоятельством, что это же поле при достижении определенного значения  $H_c$  (критическое поле) разрушает сверхпроводимость и сопротивление восстанавливается. Критическое поле увеличивается при уменьшении температуры от нуля при  $T_c$  до максимального значения при  $T_c \rightarrow 0$  К. Для чистых металлов это значение невелико: у  $Pb \sim 800$  Э, у  $Nb \sim 2000$  Э. В 50-х годах были открыты сплавы металлов, у которых  $T_c$  были в диапазоне 10-20 К. Но главное — они обладали колоссальными критическими полями. Несколько практически важных сплавов приведены в таблице 1. Технология получения этих сплавов и изготовление из них материалов для обмоток соленоидов сложна и трудоемка. Поэтому соленоид из них не является дешевым изделием. Но эксплуатация таких устройств проста и дешева, так как для этого требуются лишь жидкий гелий и низковольтный источник тока малой мощности (в большинстве случаев не более 1 кВт). Конструкции соленоидов — это

катушки, намотанные из композиционных материалов (из сверхпроводника и меди) в виде одножильных и многожильных проводов, шин и лент.

| Сплав                   | $T_c$ , К | $H_k$ , Э<br>(Т~4К) |
|-------------------------|-----------|---------------------|
| <i>NbZr</i>             | 10,5      | 90 000              |
| <i>NbTi</i>             | 101       | 20 000              |
| <i>Nb<sub>3</sub>Sn</i> | 18        | 270 000             |
| <i>V<sub>3</sub>Ga</i>  | 14,5      | 250 000             |

В настоящее время прогресс в этой области достиг такого уровня, что поля до  $10^5$  Э доступны практически для любой лаборатории, а иметь поле до  $(1,5\cdot1,8)\cdot10^5$  Э — это лишь вопрос финансовых возможностей.

В заключение этого раздела расскажем о замечательной возможности снизить энергозатраты на генерацию еще больших полей (до  $3\cdot10^5$  Э), которая реализована в ряде стран (Россия, Франция, США). Это использование комбинации из сверхпроводящего и водоохлаждаемого соленоидов (гибридный соленоид), в которой суммируются максимально достижимые поля как того, так и другого. Естественно, что водоохлаждаемый соленоид должен размещаться внутри сверхпроводящего. Конечно, создание установки с гибридным соленоидом — сложная и объемная научно-техническая проблема, и для ее решения необходим труд больших коллективов различных научных учреждений. Гибридная система успешно работает в Институте атомной энергии Российской Академии наук. Ее сверхпроводящий соленоид весит около 1500 кг и в объеме диаметром 40 см дает поле до  $7\cdot10^4$  Э. Обмотка изготовлена из сплавов *NbZn* и *NbTi*. Водоохлаждаемый соленоид намотан медной шиной. При мощности 5,6 МВт (ток 25 кА) в объеме диаметром 5 см получается поле до  $1,8\cdot10^5$  Э. Рекордное суммарное поле системы —  $2,5\cdot10^5$  Э. Это не предел для гибридных соленоидов, так как вполне реально получение полей до  $10^5$  Э в сверхпроводящем соленоиде и  $2,5\cdot10^5$  Э — в водоохлаждаемом. Можно надеяться, что это вопрос ближайшего времени.

### 3.3. Импульсные магнитные поля

Импульсные магнитные поля условно делятся на два класса: класс сильных и класс сверхсильных магнитных полей. В первом магнитное поле получается без разрушения и существенной деформации соленоида; его значение лежит в области до  $(5\text{--}7)\cdot10^5$  Э. Здесь используются главным образом геликоидальные соленоиды, выточенные из прочных материалов (бронзы, стали). Во втором соленоид либо сильно деформируется, либо полностью разрушается; диапазон получаемых с их помощью полей простирается в область свыше  $10^6$  Э. Соленоиды для сверхсильных полей — исключительно одновитковые. Они просты и дешевы в изготовлении.

Принципиальная возможность использовать импульсные магнитные поля для научных исследований связана с тем, что характерные времена многих физических явлений и процессов существенно меньше времени существования импульсного поля, так что для них последнее можно рассматривать как квазистационарное.

Идея метода получения импульсного магнитного поля была высказана П.Л. Капицей в 1923 году и успешно реализована им в последующей научной деятельности. Идея эта очень проста: для генерации сильного магнитного поля необходима очень большая мощность ( $H \sim I \sim W^{1/2}$ ). Ее можно получить, если сравнительно небольшую энергию  $E$  реализовать за короткий промежуток времени  $t$  в соленоиде. Тогда  $W \sim E/t$ . Существенно, чтобы диссипируемая энергия  $E$  не приводила к тепловому разрушению соленоида. Установки для импульсных магнитных полей состоят из четырех основных частей: источника энергии, накопителя энергии, ключа и собственно соленоида. В 20-е годы наиболее эффективным накопителем энергии оказался специально разработанный Капицей механический накопитель кинетической энергии. Это был генератор переменного тока, сконструированный для работы в короткозамкнутом режиме. Источником энергии был мотор постоянного тока на 60 кВт. Он раскручивал массивный ротор генератора (2,5 тонны) до 3500 об/мин. В момент, когда напряжение проходило через нуль, механический ключ, синхронно работающий с генератором, замыкал цепь генератора на соленоид на время первого полупериода тока. Часть накопленной в роторе кинетической энергии переходила в электрическую. В цепи соленоида развивалась мощность до 50 МВт при токе до  $7,2 \cdot 10^4$  А. Соленоиды навивались в несколько слоев шиной квадратного сечения. Шина изготавливалась из кадмиевой бронзы, чье электрическое сопротивление было близко к меди, а механическая прочность — к стали. Капице удалось получить поля до  $5 \cdot 10^5$  Э длительностью  $\sim 0,01$  секунды. Он выполнил на своей установке исследования по физике твердого тела, которые стали классическими.

В последующем в послевоенные годы в этом методе претерпели изменения лишь основные узлы установки: источник энергии — высоковольтные выпрямители постоянного тока, накопители — батареи высоковольтных конденсаторов большой емкости, ключи — вакуумные разрядники. Конденсаторные батареи при емкости в несколько тысяч микрофард и напряжении до 30 кВ способны накопить энергию в несколько мегаджоулей и получать в импульсе мощность в десятки мегаватт.

По существу, после того как заряженная батарея конденсаторов замыкается на соленоид, электрическая цепь является колебательным контуром, в котором возникают свободные затухающие колебания тока:

$$I = I_0 e^{-kt} \sin \omega t, \quad (4)$$

где  $k = R/L$ , частота

$$\omega = \sqrt{\frac{1}{LC} - \frac{R^2 C}{4L^2}}.$$

Соответственно  $L$ ,  $C$ ,  $R$  — индуктивность, емкость и сопротивление всей цепи.

При слабом затухании /о можно оценить из баланса энергии:

$$I_0 = U_0 \sqrt{\frac{C}{L}}.$$

Из (4) видны пути увеличения максимально достижимого поля, когда возможности конденсаторной батареи исчерпаны. Необходимо уменьшать сопротивление и индуктивность подводящей ток цепи. Для этой же цели иногда охлаждают соленоид жидким азотом. Сопротивление соленоида при этом падает в 10 раз.

Импульсные сильные магнитные поля успешно используются во многих лабораториях. Наиболее известна сейчас магнитная лаборатория в Токийском университете, где были недавно получены поля напряженностью до  $10^6$  Э при длительности импульса  $\tau \sim 0,01$  секунды.

Метод, аналогичный описанному, применяется и для получения сверх-сильных магнитных полей. Увеличение мощности происходит за счет уменьшения длительности импульса (интервал  $t$  перемещается в область микросекунд). Но это одноразовые опыты, так как соленоиды разрушаются. Жертвуя соленоидом и всем, что находится внутри него, удастся получать поля  $5 \cdot 10^6$  Э. Это рекорд. Он достигнут в Институте атомной энергии РАН в Москве.

### 3.4. Сжатие магнитного потока

Дальнейший прогресс получения еще больших значений поля был связан с оригинальным и красивым методом — увеличением плотности магнитного потока путем сжатия проводящего кольца или цилиндра. Идея и реализация этого метода принадлежат А.Д. Сахарову (1951 г., см. [Кнопфель Г., 1972]), который работал в то время в закрытой области. В открытой печати этот же метод теоретически рассмотрел Я.П. Терлецкий в 1957 году.

Суть метода в следующем. Возьмем цилиндрическое тонкостенное кольцо из проводящего материала радиусом  $r_n$ , которое пронизывает начальное магнитное поле  $H_n$ . Тогда полный поток магнитного поля через кольцо  $\Phi_n = S_n H_n$ , где  $S_n$  — начальная площадь, заключенная внутри кольца. Подвергнем кольцо быстрой деформации по радиусу (сжатию), такой, что оно изменяется подобно самому себе. В кольце возникнут токи, стремящиеся сохранить поток  $\Phi_n$ . На конечной стадии сжатия радиус кольца уменьшится до величины  $r_k$ . Если время затухания тока существенно превышает время сжатия, то потерями можно пренебречь, то есть считать, что поток через кольцо сохраняется; откуда следует, что конечная плотность магнитного потока

$$H_K = H_H \left( \frac{r_H}{r_K} \right)^2 \quad (5)$$

Больших успехов в использовании метода сжатия магнитного потока достигли российские и итальянские физики. Первоначально деформация кольца (обычно медного) проводилась с помощью направленного взрыва взрывчатого вещества (ВВ). Один из вариантов опытов показан на рисунке 3.4.1, а. Тонкостенное медное кольцо, называемое "лайнер", окружает кольцевой заряд ВВ. Внутри кольца плотно вставлен соленоид с небольшим числом витков. Это импульсный соленоид, задающий начальный поток  $\Phi_H$ . Его время работы рассчитано так, что оно больше времени затухания тока в кольце, для того чтобы начальное поле смогло проникнуть внутрь кольца. После того как это достигнуто, производится подрыв ВВ по всей внешней периферии. Развивающееся давление приводит к пластической деформации лайнера, и он начинает сжиматься. Сжатие прекращается в тот момент, когда сравниваются электродинамические силы в лайнере с силами взрыва. При удачном проведении опыта, используя массу ВВ в 20 кг, медный лайнер диаметром около 10 см и начальное поле  $10^5$  Э, удается получить поле до 210 Э. Имеются и другие варианты сжатия магнитного потока с помощью взрыва (рис. 3.4.1, б).

Более деликатный, изящный и дешевый метод без применения ВВ предложен японскими учеными из Токийского университета. В нем лайнер располагается внутри прочного одновиткового соленоида. Затравочное поле  $H_H$  получается от двух катушек, расположенных с двух сторон по торцам лайнера. Разряд мощной батареи конденсаторов на одновитковый соленоид наводит в лайнере токи, текущие в направлении, противоположном токам этого соленоида. Взаимодействие токов деформирует и сжимает лайнер. В этом методе разрушается только лайнер. Метод не требует проведения экспериментов на специальных полигонах. Достаточно стального бокса объемом в несколько кубических метров. Этим методом достигнуты поля до  $2 \cdot 10^6$  Э. На рисунке 3.4.2 представлены последовательные стадии сжатия лайнера, полученные скоростной фотографией.

Интересно здесь упомянуть, что природа тоже, по-видимому, использует метод сжатия магнитного потока для сверхсильных магнитных полей. Полагают, что при коллапсе массивной звезды и превращении ее в нейтронную ее радиус уменьшается с  $10^6$  до 10 км. В силу большой проводимости, а возможно и сверхпроводимости на определенном этапе сжатия, захватывается первоначальный магнитный поток. При начальном поле в  $10^2$  Э поле может возрасти до 10 Э. Природа звезд-пульсаров связывается с существованием таких полей.

Наконец в заключение этого раздела укажем, что и сверхслабые магнитные поля получаются аналогичным способом. Только в этом случае производится не сжатие, а расширение оболочек, выполненных из сверхпроводника. Расширение происходит медленно с помощью механических устройств. Удается получать поля до  $10^{-8}$  Э.

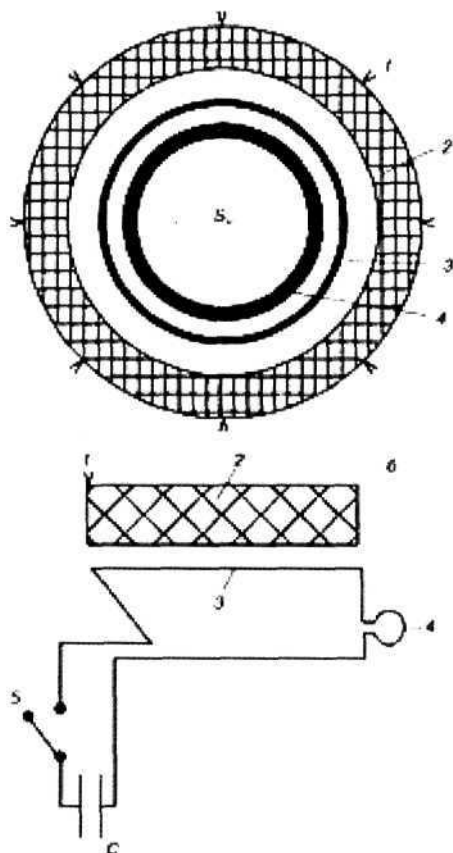


Рис. 3.4.1. Варианты метода "сжатия магнитного потока":

а — Сжатие лайнера: 1 — электрические детонаторы; 2 — взрываемый заряд ВВ; 3 — лайнер — металлическое кольцо; 4 — импульсный соленоид, задающий начальное поле  $H_0$ ;  $S_0$  — начальная площадь захвата потока поля.

б — Сжатие потока поля в устройстве типа "кузнечные меха": 1 — электродетонатор; 2 — пластина ВВ; 3 — профиль изогнутой медной пластины, образующей площади  $S_0$  и  $S_k$ ,  $S_0 \gg S_k$ ; 4 — одновитковый соленоид, образованный медной пластиной; 5 — ключ; С — батарея конденсаторов. После замыкания ключа 5 батарея конденсаторов С генерирует начальный поток поля во всей области  $(S_0 + S_k)$ , охватываемой медной пластиной 3. В момент достижения максимального тока подрывается заряд ВВ. Взрыв начинается слева, поэтому пластина 3 замыкается, захватывая начальный поток поля.

Взрыв распространяется вправо, вытесняя поток в катушку 4.

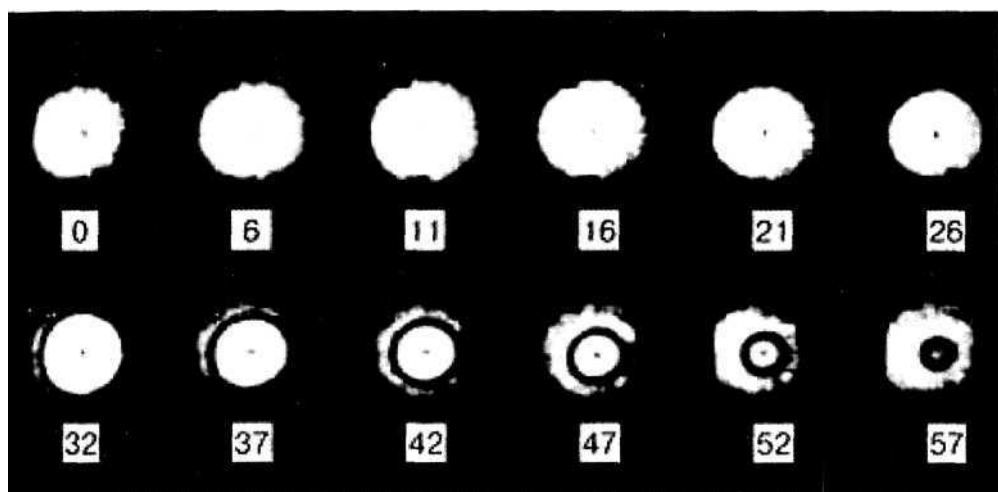


Рис. 3.4.2. Скоростная фотография последовательных стадий сжатия лайнера. У каждого фрагмента указано время в микросекундах. Начиная с 32 мкс виден сжимаемый лайнер — темное кольцо

## Заключение

Таблица 2 дает представление о величинах магнитного поля и временах их существования, получаемых различными методами.

### Область и время существования поля и метод его получения Н, Э

|                                                      |                      |
|------------------------------------------------------|----------------------|
| Нейтронная звезда                                    | 10                   |
| Сжатие магнитного потока ( мкс)                      | $(2-2,5) \cdot 10^7$ |
| Разряд конденсаторной батареи на импульсный соленоид | $10^6$               |
| То же, однократная разрушающая генерация             | $5 \cdot 10^6$       |
| Гибридные магнитные системы, стационарное поле       | $3 \cdot 10^6$       |
| Биттеровские соленоиды, стационарное поле            | $2,5 \cdot 10^6$     |
| Сверхпроводящие соленоиды                            | $1,8 \cdot 10^6$     |
| Рекордные электромагниты                             | $7 \cdot 10^6$       |
| Стандартные лабораторные электромагниты              | $(2-3) \cdot 10^4$   |

|                                     |                      |
|-------------------------------------|----------------------|
| Постоянные магниты                  | $(1 - 8) \cdot 10^3$ |
| Поле Земли                          | 0,2 - 0,5            |
| Межпланетное пространство           | $10^{-4}$            |
| Сердце человека                     | $5 \cdot 10^{-7}$    |
| Расширение сверхпроводящих оболочек | $3 \cdot 10^{-9}$    |

Конечно, получение сильных магнитных полей не является самоцелью ученых и инженеров, а дает в руки исследователей мощный инструмент познания природы. И этот инструмент эффективно используется. Но мы лишены возможности описать здесь результаты научных исследований. Надеемся, что заинтересованный читатель найдет хорошие обзоры на эту тему в доступной ему литературе, список которой приводится ниже. Прокомментируем его.

В [Карасик В.Р., 1964] наиболее полно изложены методы получения магнитных полей с помощью электромагнитов, соленоидов и сверхпроводников. В [Кнопфель Г., 1972] достаточно полно рассмотрен метод сжатия магнитного потока. Сборник [Ф. Херлах и др., 1988] позволяет узнать как о принципах генерации магнитного поля, так и о действующих в этой области лабораториях. В нем содержится обзор некоторых результатов, полученных в области физики твердого тела и биологии. В [Лагутин А.С., Ожогин В.И., 1988] рассмотрены методы и техника генерации сильных и сверхсильных магнитных полей, обсуждаются перспективы прогресса в этой области. Наконец ["Природа", 1994, N 4.] — это специальный выпуск журнала "Природа", посвященный 100-летию П.Л. Капицы. Он интересен в целом, и в нем есть статья, посвященная самым последним достижениям в области сильных магнитных полей и полученных с их помощью научных результатов.

## Литература

1. Карасик В.Р. Физика и техника сильных магнитных полей. М.: Наука, 1964.
2. Кнопфель Г. Сверхсильные импульсные магнитные поля. М.: Мир, 1972.
3. Сильные и сверхсильные магнитные поля / Под ред. Ф. Херлаха. М.: Мир, 1988.
4. Лагутин А.С., Ожогин В.И. Сильные импульсные магнитные поля в физическом эксперименте. М.: Энергоатомиздат, 1988.
5. "Природа", 1994, N 4.
6. [www.phys.web.ru](http://www.phys.web.ru)



### 3.5. Магнитное поле Земли

**Геомагнетизм**, земной магнетизм, магнитное поле Земли и околоземного космического пространства. Земля обладает магнитным полем дипольного типа, как будто бы в ее центре расположен гигантский полосовой магнит. Конфигурация этого поля медленно изменяется, вероятно в результате движения расплавленного материала во внешнем ядре Земли на глубинах более 2900 км. Главное магнитное поле обусловлено источниками, расположенными в глубинах Земли. На медленные вариации главного магнитного поля накладываются быстрые, но слабые изменения, вызванные электрическими токами в ионосфере. Электрические свойства ионосферы связаны с присутствием в ней заряженных частиц, возникающих при ионизации атмосферы солнечным излучением. Ветры, дующие в ионосфере в присутствии постоянного магнитного поля Земли, приводят к возникновению электрических токов, которые, в свою очередь, создают дополнительное изменяющееся магнитное поле.

Кроме этих регулярных магнитных вариаций, наблюдаются также возмущения, обусловленные происходящими время от времени солнечными вспышками — источниками ультрафиолетовых и рентгеновских лучей и возмущенного потока заряженных частиц солнечного ветра. Эта радиация увеличивает ионизацию и вызывает дополнительные электрические токи в ионосфере. Временами солнечный ветер настолько эффективно взаимодействует с геомагнитным полем, что формирует кольцевой электрический ток на расстоянии в несколько радиусов земного шара; это приводит к уменьшению главного магнитного поля; такие магнитные возмущения ощущаются во всем мире, но наиболее сильно проявляются в полярных районах. В периоды сильных магнитных возмущений происходят особенно интенсивные полярные сияния, а также часто нарушается дальняя радиосвязь.

Исследования магнитного поля Земли используются для изучения физического состояния глубоких недр и процессов, происходящих в высоких слоях атмосферы. Наблюдения магнитных вариаций проводятся на земной поверхности, в океанах, а также с воздуха и из космоса с помощью самолетов и спутников. Магнитное поле играет также важную роль в областях, отстоящих от поверхности Земли на тысячи и более километров; в их пределах интенсивный поток частиц, захваченных магнитным полем, создает серьезные проблемы для аэрокосмических исследований. Солнечные и галактические космические лучи, несмотря на их высокую энергию, отклоняются магнитным полем Земли до того, как попадут в пределы атмосферы.

**Историческая справка.** Если полосовой магнит свободно подвесить на нити, прикрепленной к его центру, ось магнита в первом приближении ориентируется в направлении север — юг. Точно не известно, когда было впервые обнаружено такое свойство магнита. Возможно, китайцы были знакомы с ним уже в 1100, однако практическое использование этого явления началось лишь 200 лет спустя. В Западной Европе магнитный компас применяется в навигации с 1187.

Основы науки о геомагнетизме были заложены в период между 13 и 16 столетиями. К середине 15 в. стало известно, что подвешенный магнит не всегда указывает точно на север. Первые сведения о наклонении направления земного магнитного поля относительно горизонтальной плоскости появились в середине 16 в. В 1600 У.Гильберт, придворный врач Елизаветы I, опубликовал знаменитый трактат О магните, магнитных телах и о большом магните - Земле. Новая физиология, доказанная множеством аргументов и опытов (*De magnete, magneticisque corporibus et de magno magnete tellure. Physiologia nova*; рус. перевод 1956), в котором описал свойства магнита и земного магнетизма. Он отметил, что Земля, по-видимому, является огромным сферическим магнитом.

Вариации магнитного поля во времени были зафиксированы в 1635 Г.Геллибрандтом, профессором астрономии Грешам-Колледжа (Лондон). В 1701 астроном Э.Галлей опубликовал первую карту геомагнитного поля. В середине 18 в. была установлена связь между полярным сиянием и магнитными вариациями. В 19 в. К.Гаусс, внесший большой вклад в развитие знаний о геомагнетизме, усовершенствовал приборы для измерения магнитных вариаций и установил их в магнитной обсерватории в Гёттингене, построенной в 1833 из немагнитных материалов. В 1834 Гаусс и В.Вебер приняли участие в программе Ф.Гумбольдта наблюдений за магнитными явлениями, которую одновременно проводили ок. 50 обсерваторий, входивших в Гёттингенский магнитный союз. Гаусс обобщил магнитные данные и математически доказал гипотезу Гильберта о том, что источник главного (основного) магнитного поля находится внутри Земли.

**Описание геомагнитного поля.** В любой точке Земли магнитное поле исчерпывающим образом характеризуется его интенсивностью и направлением, угол которого с горизонтальной плоскостью называется магнитным наклонением ( $I$ ). Если спроектировать поле на горизонтальную плоскость, направление в первом приближении будет ориентировано с севера на юг, но в общем случае будет образовывать некоторый угол с истинным направлением географического меридиана; это отклонение носит название магнитного склонения ( $D$ ). Амплитуда, или напряженность, магнитного поля называется полной магнитной интенсивностью ( $F$ ). Магнитное поле может быть представлено двумя взаимно перпендикулярными компонентами: горизонтальной ( $H$ ) и вертикальной ( $Z$ ). Если векторы, показывающие интенсивность и направление горизонтальной компоненты в различных точках Земли, нанести на карту, то видно, что они расходятся от точки вблизи Южного полюса и сходятся в точке вблизи Северного полюса. Эти точки называются соответственно Южным и Северным магнитными полюсами. На полюсах магнитное поле направлено вертикально. Линию, на которой магнитное поле направлено горизонтально, называют магнитным экватором.

Магнитные полюсы не совпадают с географическими и весьма быстро перемещаются. Северный магнитный полюс находится в северных водах Канады. Его координаты в 1900 были  $69^\circ$  с.ш. и  $97^\circ$  з.д., в 1950 —  $72^\circ$  с.ш. и  $96^\circ$

з.д., в 1980 -  $75^{\circ}$  с.ш. и  $100^{\circ}$  з.д., а в 1985 -  $77^{\circ}$  с.ш. и  $102^{\circ}$  з.д. Южный магнитный полюс в 1985 имел координаты  $65,5^{\circ}$  ю.ш. и  $139,5^{\circ}$  в.д. Прямая линия, проведенная через эти магнитные полюсы, не проходит через центр Земли.

Измерения геомагнитного поля показывают, что на поверхности Земли в целом оно может быть представлено как поле полосового магнита, помещенного в центре планеты. Его еще называют полем магнитного диполя; вне сферы оно имеет такую конфигурацию, как если бы сфера была однородно намагничена. Эта модель дает наилучшее (но далеко не идеальное) совпадение с действительным полем. Две точки, в которых ось диполя пересекает земную поверхность, называют геомагнитными полюсами. В начале 1990-х годов геомагнитный экватор был наклонен к географическому экватору на  $12^{\circ}$ . Северный геомагнитный полюс имел координаты  $79^{\circ}$  с.ш. и  $70^{\circ}$  з.д., а ось диполя отстояла от центра Земли на 460 км в направлении Тихого океана ( $18^{\circ}$  с.ш.,  $148^{\circ}$  в.д.). Полная магнитная напряженность на геомагнитных полюсах равняется примерно 0,6 гаусс, на магнитном экваторе напряженность примерно вдвое меньше.

**Магнитные карты.** Распределение геомагнитного поля у земной поверхности может быть представлено в виде изомагнитных линий, т.е. линий, вдоль которых значение конкретной компоненты остается постоянным. Карты склонения называются картами изогон (рис. 3.5.1). Магнитные карты основаны на многочисленных магнитных съемках, выполняемых на суше, на море и с

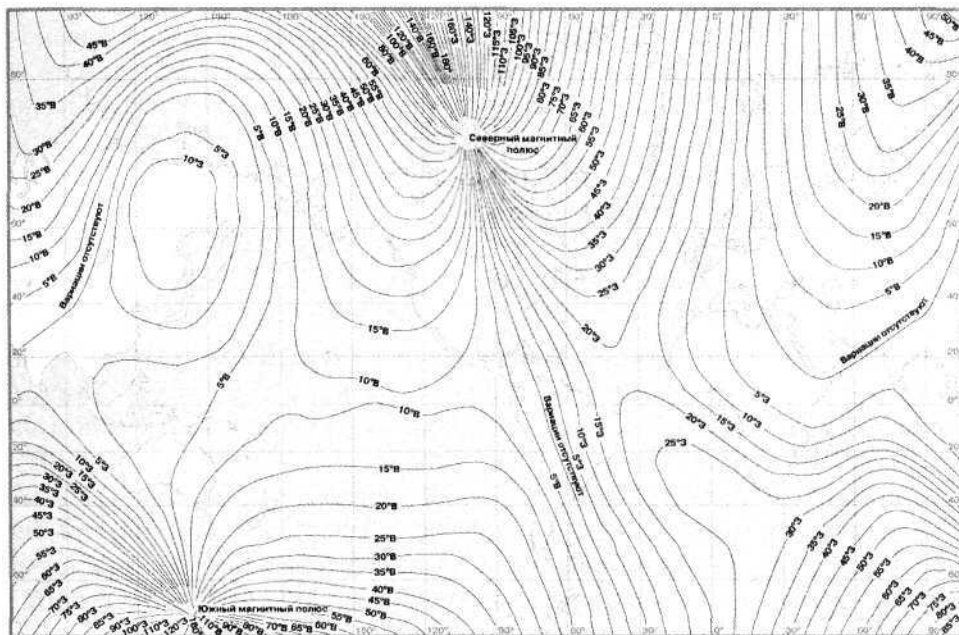


Рис. 3.5.1.

воздуха. В США магнитные карты готовятся Береговой и геодезической службой и Военно-гидрографическим управлением.

В дополнение к магнитным съемкам высокоточные наблюдения за магнитным полем Земли ведутся во всех частях мира в магнитных обсерваториях. Со спутников осуществляются магнитные съемки на больших высотах, где не существует влияния региональных магнитных аномалий, таких, как намагниченные тела в земной коре, например железные руды.

**Магнитные измерения.** В магнитных обсерваториях через регулярные интервалы времени определяют абсолютные значения магнитных элементов (а не их вариаций) с возможно большей точностью.

Магнитное склонение  $D$  определяется путем измерения азимута (горизонтального направления) стрелочного магнита, свободно подвешенного на некрученной нити таким образом, что магнит располагается горизонтально. Азимут отсчитывается от направления на географический север, который устанавливается с помощью астрономических или геодезических наблюдений. Стандартными приборами магнитное склонение определяется с точностью  $0,1'$ .

Первоначально магнитное наклонение  $I$  определялось путем измерения наклона магнитной стрелки, центр которой закреплен на горизонтальной оси; эта ось ориентируется перпендикулярно магнитному меридиану таким образом, что стрелка может поворачиваться в плоскости меридиана. Однако точность этих измерений была невысокой, поэтому стали пользоваться индукционным наклономером, состоящим из круглой многovitковой катушки, которая вращается с большой скоростью вокруг оси, проходящей вдоль диаметра катушки. Ось прикрепляется к рамке таким образом, что ее ориентация может быть измерена. Этот метод основан на возникновении в катушке индуцированного электрического тока при изменении проходящего через нее магнитного потока. Если направление оси катушки не совпадает с направлением магнитного поля, то внутри катушки индуцируется переменный ток. Направление магнитного поля определяется в момент, когда гальванометр не показывает индуцированного тока во вращающейся катушке. С помощью индукционного наклонометра магнитное наклонение может быть установлено с точностью до  $0,1'$ .

Интенсивность горизонтальной составляющей измеряется методом, который разработал Гаусс. Измерения выполняются в два этапа. Вначале измеряется период крутильных колебаний свободно вращающегося в горизонтальной плоскости магнита; этот период зависит от напряженности геомагнитного поля  $Y$ , а также от магнитного момента  $M$  и момента инерции магнита. Затем к магниту прикрепляют немагнитную полоску с известным моментом инерции, после чего эксперимент повторяют. Благодаря добавлению момента инерции период колебаний изменяется, что позволяет вычислить произведение  $MH$ . На втором этапе измеряют отклонение магнитной стрелки под влиянием земного магнитного поля и под действием поля магнита, использованного в первом эксперименте, получая отношения  $M/H$ . Комбинируя обе величины,  $MH$  и  $M/H$ , можно установить  $H$ .

Сходным образом измеряют вертикальную компоненту  $Z$ . Если определено  $H$  и  $Z$ , магнитное наклонение может быть найдено из соотношения  $\operatorname{tg} I = Z/H$ .

**Протонный магнитометр.** Его действие основано на ядерной прецессии (изменении ориентации оси вращения) вокруг направления магнитного поля. Ядра водорода (протоны), находящиеся в воде, под влиянием искусственного магнитного поля, ориентированного примерно под прямым углом к земному магнитному полю, поляризуются. Затем поляризующее магнитное поле внезапно выключается. Протоны начинают свободно прецессировать вокруг направления земного магнитного поля  $F$  до тех пор, пока ядерные спины не достигнут нового равновесного состояния. Прецессия протонов индуцирует небольшую электродвижущую силу в катушке. Частота  $f$  этого сигнала такая же, как частота прецессии протонов и связана с величиной магнитного поля  $F$  соотношением  $2\pi f = \gamma F$ , где  $\gamma$  — гиромагнитное отношение протона, известное с высокой точностью. Измерение частоты сигнала в катушке позволяет определить общую магнитную интенсивность. Сконструированы также протонные магнитометры для измерения  $H$  и  $Z$ . При измерении каждого из этих компонентов используется пара колец Гельмгольца (катушки для создания чрезвычайно однородного магнитного поля) с тем, чтобы привести к нулевому значению компонент, который в данный момент не подлежит измерению.

**Вековые магнитные вариации.** Годовые средние значения магнитных элементов, измеренные в обсерваториях, и результаты магнитных съемок, выполненные с интервалом в несколько лет, показывают, что земное магнитное поле подвергается вековым (медленно меняющимся) вариациям. Эти вариации наносят на карты в виде линий равных значений годовых изменений (карты изовариаций, или изопор) определенных эпох. Изопоры образуют овалы вокруг регионов, где происходят быстрые годовые изменения. В течение одной или двух декад изопоры могут существенно изменяться. Их центры имеют тенденцию к дрейфу в западном направлении.

Наблюдается также медленное вращение направления поля вокруг некоторого фиксированного направления. Например, наблюдения в Лондонской обсерватории показывают, что магнитное поле совершило почти три четверти оборота за последние 400 лет.

**Палеомагнетизм.** Изучение магнетизма, "сохраненного" в минералах и горных породах, обеспечивает информацию об истории земного магнитного поля в геологическом прошлом. Если горячее вещество охлаждается в магнитном поле от температуры выше точки Кюри (температура, выше которой намагниченное вещество теряет свою намагниченность) до более низких температур, его остаточная намагниченность будет сохранять направление внешнего магнитного поля, существовавшего при охлаждении. Поэтому сформировавшиеся из расплава минералы "запоминают" направление геомагнитного поля. Кроме того, при осадконакоплении намагниченные частицы в водных бассейнах ориентируются под воздействием земного магнитного поля. Эти

феномены лежат в основе палеомагнетизма, но их интерпретация исключительно сложна, поскольку магнетизм пород не всегда стабилен.

Палеомагнитные данные легли в основу теории дрейфа материков. В результате исследований разновозрастных горных пород было установлено, что их намагниченность отклоняется от направления современного магнитного поля. Таким образом, создается впечатление, что магнитные полюса в геологическом прошлом перемещались относительно поверхности Земли. Это интерпретируется как свидетельство того, что взаимное расположение материков в разные геологические эпохи менялось.

**Природа магнитного поля Земли и его вековых вариаций.** Главное дипольное магнитное поле Земли можно было бы объяснить, если бы она была однородно намагничена. Однако намагниченность пород поверхностных слоев противоречит этому. Лабораторные эксперименты показывают, что точка Кюри понижается с увеличением давления. Поскольку давление и температура увеличиваются с глубиной, представляется весьма маловероятным, что ниже определенной глубины ферромагнитные вещества могут сохранять свою намагниченность. Хотя лабораторные эксперименты не полностью моделируют температуру и давление в глубоких слоях Земли, принято считать, что главное магнитное поле Земли не может быть обусловлено постоянной намагниченностью земного вещества.

Сейсмические и другие геофизические данные показывают, что Земля обладает ядром (сходным по плотности с железом или железо-никелевым сплавом), которое находится на глубине ок. 2900 км и обнаруживает некоторые свойства жидкости. У.Эльзассер, Э.Буллард и другие ученые предположили, что в ядре происходят конвективные движения. Перемещение проводящего вещества в магнитном поле индуцирует электродвижущую силу, которая вызывает электрические токи, порождающие дополнительное магнитное поле подобно действию самовозбуждающейся динамо-машины.

Магнитное поле вблизи центров векового хода может быть хорошо представлено изолированными диполями, расположенными вблизи поверхности "жидкого" ядра Земли. Относительно короткое время, за которое происходят вековые вариации, подтверждает, что их причина связана с движениями в ядре. Электрические токи, индуцируемые этими перемещениями вблизи поверхности ядра, вероятно, приводят к возникновению вековых вариаций.

**Вариометры.** В дополнение к абсолютным измерениям геомагнитного поля магнитные обсерватории ведут непрерывную запись компонентов  $H$ ,  $D$  и  $Z$ , поскольку происходят регулярные и нерегулярные вариации магнитного поля. Амплитуда этих вариаций гораздо меньше, чем напряженность постоянного магнитного поля. Приборы для измерения вариаций называются вариометрами. Их действие основано на том, что изменения каждого магнитного элемента вызывают соответствующее отклонение магнитной стрелки, к которой прикрепляется зеркальце, а на него направляется свет от маленькой лампы. Отраженный луч падает на поверхность покрытого фотобумагой цилиндра, который вращается с постоянной скоростью вокруг своей оси. В вариометрах,

одновременно измеряющих три компонента поля, фиксируются сразу три кривых на одной магнитограмме (рис. 3.5.2). Для регистрации вариаций различной амплитуды и частоты используют разные типы вариометров.

**Квантовый магнитометр.** Для наблюдений за быстропротекающими вариациями разработан магнитометр на парах рубидия. Этот прибор использует оптическую накачку. Свет от рубидиевой лампы проходит через камеру, содержащую пары рубидия, и падает на фотоэлемент, регистрирующий интенсивность света. Магнитометр ориентируют так, чтобы луч света располагался почти параллельно магнитному полю. Если приложить переменное магнитное поле, создаваемое катушкой и имеющее частоту, соответствующую одному из зеемановских переходов в атомах рубидия, то увеличится поглощение за счет магнитного резонанса. Частота, соответствующая зеемановскому переходу, представляет собой известную функцию напряженности магнитного поля. Резонансная частота определяется частотой прилагаемого магнитного поля, что позволяет установить интенсивность магнитного поля.

Магнитометр на парах рубидия приемлем для точных измерений быстро меняющихся вариаций магнитного поля, поскольку с его помощью может быть достигнута чувствительность порядка 0,02 гаммы (1 гамма =  $10^{-5}$  гаусс =  $10^{-9}$  тесла = 1 нТ). Для измерения абсолютных значений интенсивности используют протонный магнитометр.

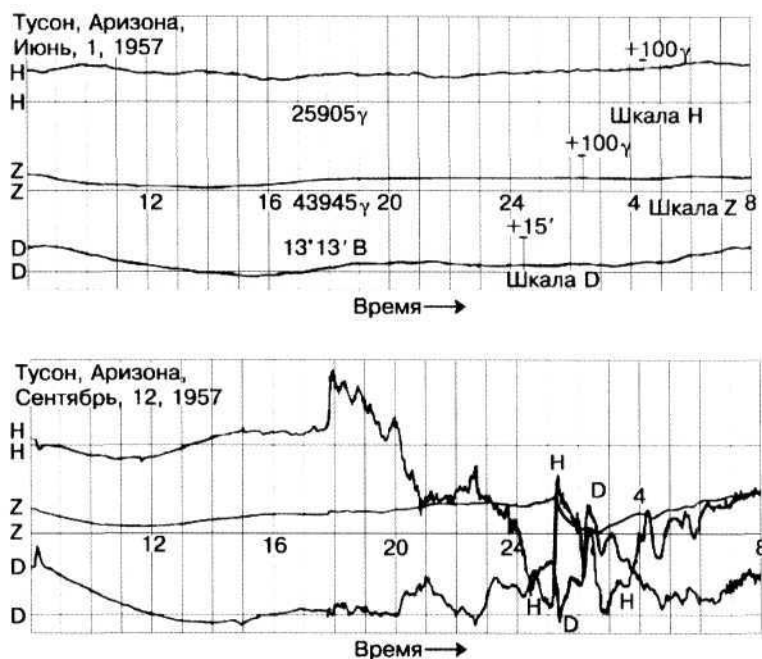


Рис. 3.5.2. Магнитограммы явлений в земной атмосфере, полученные в Тусоне (Аризона, США). Верхняя магнитограмма показывает запись в магнитоспокойный день, нижняя — во время магнитной бури

Солнечные и лунные магнитные вариации. В соответствии с характером записи вариаций на магнитограмме выделяются "магнито-спокойные" и "магнито-возмущенные" дни. Эти магнитные возмущения гораздо более часты и интенсивны в полярных широтах.

Даже в идеально спокойных условиях записи на одной станции магнитные элементы  $H$ ,  $D$  и  $Z$  систематически изменяются в зависимости от времени. Эти вариации носят название солнечно-суточной спокойной магнитной вариации и обозначаются  $S_q$ ; здесь  $S$  показывает, что вариация зависит от местного времени обсерватории (т.е. от ее долготы относительно Солнца), а индекс  $q$  означает "спокойный".

К северу и югу от экватора вплоть до  $30^\circ$  вариация  $S_q$  горизонтальной составляющей  $H$  соответственно увеличивается (в северном направлении) в течение дневного времени с максимумом вблизи полудня и уменьшается (в южном направлении) в ночное время; фаза вариации меняется на обратную к северу или югу от экваториального пояса. В северном полушарии  $S_q$  склонения  $D$  имеет направление на восток в утренние часы и на запад — в послеполуденное время; то же самое относится к вертикальной составляющей  $Z$ , которая уменьшается к ночи. Эти изменения  $D$  и  $Z$  меняют свой знак на обратный к югу от экватора.

Если рассматривать все три элемента совместно,  $S_q$  имеет амплитуду, гораздо большую днем, чем ночью, что указывает на то, что  $S_q$  возникает в результате электрических токов, текущих в ионосфере. Электрические токи, ответственные за возникновение  $S_q$ , измеряются с помощью геофизических ракет, запускаемых вблизи экватора.

Осредненные за месяц или год величины амплитуд  $S_q$  меняются в соответствии с изменением солнечной активности; они наибольшие, когда на Солнце наблюдается максимум пятен. Амплитуда  $S_q$  и, до некоторой степени, ее глобальное распределение ежедневно меняются; тем не менее в этих изменениях не наблюдается простого следования за солнечной активностью.

Имеются и другие регулярные вариации, наложенные на  $S_q$  и меняющиеся в зависимости от лунного времени. Эти вариации, названные "лунно-суточными вариациями" ( $L$ ), представлены главным образом регулярными полусуточными изменениями магнитного поля. Их амплитуда гораздо меньше, чем амплитуда  $S_q$ , например, вариация  $S_q$  горизонтальной составляющей  $H$  колеблется в пределах 30 гамм в низких широтах; колебания  $L$  — лишь ок. 3 гамм. Вариация  $L$ , в отличие от  $S_q$ , почти не выражена на магнитограммах (за исключением геомагнитного экватора, где ее величина необычно велика). Ее можно выделить лишь на основе тонкого математического анализа, в котором  $S_q$  и другие вариации подвергаются осреднению. Хотя  $L$  варьирует в зависимости от лунного времени, в основном она изменяется в дневные часы, когда электропроводность ионосферы максимальна. Следовательно, вариация  $L$  обязана электрическим токам, индуцируемым приливными движениями в нижних слоях ионосферы.



В пределах узкого пояса над магнитным экватором  $S_q$  значительно возрастает в полуденные часы. Этот эффект обусловлен существованием "электроджета" - концентрированного электрического тока, текущего в пределах узкого пояса в ионосфере. Лунно-суточная вариация  $L$  возрастает с большей скоростью, чем  $S_q$ . Полагают, что экваториальный электроджет, текущий с запада на восток, возникает вследствие повышения электропроводности в направлении поперек магнитного поля (которое в этой области направлено горизонтально).

**Магнитные бухты.** Часто наблюдаются магнитные вариации, при которых линия записи  $H$  на магнитограмме своим очертанием напоминает бухту, образованную береговой линией. "Магнитные бухты" имеют максимальную амплитуду и наиболее часто наблюдаются в авроральных зонах (зонах полярных сияний) с ночной стороны Земли, по одной в каждом полушарии; их центры отстоят от геомагнитных полюсов на  $23^\circ$ . Типичная магнитная бухта указывает на интенсивный электроджет в ионосфере в западном направлении, протекающий через авроральную зону в ранние утренние часы (по местному времени), и более слабый электроджет, текущий в восточном направлении в поздние вечерние часы. Рассеянные токи от этих авроральных электроджетов распространяются над всей Землей и возбуждают магнитные бухты гораздо меньшей интенсивности в низких широтах.

Мощные магнитные возмущения в авроральных зонах, называемые полярными штормами, тесно связаны с областью распространения полярных сияний и других полярных возмущений.

**Влияние солнечных вспышек.** В результате наблюдений за Солнцем были обнаружены неожиданные вспышки вблизи солнечных пятен. Одновременно с ними регистрируются возмущения на магнитограммах станций, расположенных на дневной стороне Земли. В земном магнитном поле солнечная вспышка вызывает неожиданное увеличение  $S_q$  длительностью 20-30 мин, поэтому эффект солнечной вспышки обозначают  $S_{qa}$ , где значок  $a$  указывает на увеличение интенсивности.

В момент вспышки возрастает поток жесткого излучения от Солнца; это приводит к увеличению ионизации, росту электропроводности ионосферы и усилению электрического тока, вызывающего  $S_q$ . Резкое увеличение ионизации в более низких областях ионосферы вызывает заметное поглощение радиоволн и перерывы радиосвязи на большие расстояния.

**Магнитная буря.** Особенно интенсивные магнитные возмущения, распространяющиеся на весь земной шар, называют магнитными бурями. Некоторые магнитные бури начинаются неожиданно и почти одновременно по всей Земле, а другие развиваются постепенно. Признаком внезапно начинающейся магнитной бури служит резкое изменение всех трех магнитных элементов на магнитограмме. Горизонтальный компонент  $H$  внезапно увеличивает интенсивность, чему иногда предшествует небольшой отрицательный импульс. При внезапном начале бури амплитуда вариации максимальна в авроральных зонах

и уменьшается по направлению к экватору; увеличение  $S_q$  и  $L$  наблюдается в пределах узкого пояса на магнитном экваторе в дневные часы.

После внезапного начала бури линия записи горизонтального компонента  $H$  в течение нескольких часов обычно располагается выше уровня, предшествовавшего буре; этот этап (положительных значений) рассматривается как первая или начальная фаза. Значения  $Y$  составляют от 10 до 20 гамм в средних широтах. За этой фазой следует существенное уменьшение до значений значительно ниже нормальных. Падение амплитуды на несколько десятков гамм во время бури средней интенсивности отвечает ее главной фазе. Максимальное отклонение достигается через 12 ч. Вслед за этим значительным уменьшением происходит медленное возвращение к нормальному уровню, которое обычно длится несколько дней. Эти особенности представляют собой осредненные характеристики магнитных бурь в средних и низких широтах; характеристики отдельных бурь могут существенно отличаться от средних. Крупные магнитные бури проходят эти фазы быстрее, чем слабые.

По мере приближения к авроральной зоне на изменения магнитного поля, связанные с магнитной бурей, накладываются магнитные бухты. Изменения поля здесь гораздо более нерегулярные и интенсивные, чем в низких широтах; вариации во время бурь могут достигать нескольких тысяч гамм. В пределах полярных шапок (околополярные области внутри авроральной зоны) степень возмущения несколько меньше, чем в авроральной зоне, но гораздо более сильная, чем в низких широтах.

Вариации в высоких широтах свидетельствуют о существовании интенсивных и концентрированных авроральных электроджетов, которые обычно направлены на восток перед "магнитной полночью" и на запад — после нее. Магнитная полночь определяется как время, когда Солнце располагается над магнитным меридианом, противоположным тому, на котором располагается станция; различие между локальной полночью и магнитной полночью зависит от положения станции (и в некоторой степени от времени года), это различие весьма незначительно в низких широтах, но в высоких широтах может достигать более одного часа. Электроджет, направленный к западу, гораздо сильнее ориентированного на восток; общая сила тока для бури средней интенсивности составляет 300 000 ампер и даже более во время максимума после магнитной полночи.

Часто магнитные бури происходят через 1-2 дня после солнечной вспышки из-за прохождения Земли через поток частиц, выброшенных Солнцем. Исходя из времени запаздывания, скорость такого корпускулярного потока оценивают в несколько миллионов км/ч.

Теория магнитных бурь была развита С.Чапменом, В.Ферраро, Х.Альфвенном, С.Зингером, А.Десслером, Е.Паркером и другими. Когда на некотором расстоянии от Земли поток солнечных частиц -- протонов и электронов -- сталкивается с земным магнитным полем, это вызывает "магнитный удар", который в виде сильной гидромагнитной ударной волны проходит через окру-

жающий Землю электропроводящий газ. Внезапное начало магнитной бури означает приход гидромагнитной ударной волны.

Солнечный газ, обволакивая Землю, сжимает ее магнитное поле и, следовательно, увеличивает его интенсивность. Рост магнитного поля в начальной фазе магнитной бури происходит как следствие этого эффекта. Некоторые из солнечных частиц захватываются земным магнитным полем на расстоянии более 40 000 км от Земли. Когда движение заряженной частицы в магнитном поле ориентировано косо по отношению к магнитной силовой линии, она перемещается по спирали вокруг этой линии. По мере того, как она вторгается в область с интенсивным магнитным полем, составляющая ее скорости, параллельная вектору напряженности поля, постепенно уменьшается, а скорость вращения возрастает, при этом общая скорость остается постоянной. Когда параллельная полю составляющая скорости становится нулевой, частица как бы отражается и начинает двигаться назад вдоль силовой линии, продолжая спиралевидное вращение вокруг нее (точка, где происходит отражение, называется "точкой магнитного зеркала", по аналогии с обычным оптическим зеркалом, отражающим свет). Таким образом, захваченные магнитным полем заряженные частицы, вращаясь по спирали вокруг силовых линий, колеблются между двумя зеркальными точками, одна из которых расположена в северном, а другая — в южном полушарии.

Магнитное поле ослабевает с увеличением расстояния от Земли, из-за чего увеличивается радиус кривизны спирального движения частиц вокруг силовых линий на внешней части траектории. К тому же магнитные силовые линии выгнуты наружу, поэтому колеблющиеся вдоль них частицы испытывают центробежное ускорение, направленное от Земли, что способствует увеличению радиуса кривизны траектории частицы в ее части, более удаленной от Земли по сравнению с более близкой к Земле. А поскольку протоны и электроны вращаются вокруг магнитных силовых линий в противоположных направлениях, эти эффекты вызывают дрейф протонов в западном направлении, а электронов — в восточном.

Суммарная скорость дрейфа зависит от энергии частицы и угла, образованного вектором ее скорости с силовой линией, когда частица пересекает экватор. Эти два фактора лежат в некотором диапазоне, поэтому частицы имеют различные скорости дрейфа и, захваченные земным магнитным полем, быстро распределяются, формируя оболочку вокруг Земли. Западный дрейф протонов и восточный дрейф электронов есть не что иное, как электрический ток, "размазанный" по оболочке. Этот ток, имеющий повсюду западное направление, генерирует магнитное поле, направленное так, что оно ослабляет магнитное поле Земли. Этим можно объяснить особенности главной фазы магнитной бури.

**Микропульсации.** Они представляют собой быстрые колебания небольшой амплитуды, которые наблюдаются как в спокойные, так и в возмущенные периоды. В средних и низких широтах часто наблюдаются два условных класса микропульсаций:  $P_c$  и  $P_r$ . Микропульсации  $P_c$  продолжаются более или менее

непрерывно в течение многих часов с периодом от 10 до 60 сек; их амплитуда составляет порядка 0,1 гамма. *Pt* состоят из рядов пульсаций с небольшой амплитудой, каждый ряд продолжается от 10 до 20 мин, индивидуальные пульсации имеют период от 40 с до нескольких минут и амплитуду ок. 0,5 гаммы. Пульсация *Pc* происходит наиболее часто в утренние часы. *Pt* часто ассоциируется с магнитными бурями и наблюдается чаще всего ночью.

При использовании более чувствительных приборов, чем обычные вариометры, выявляются пульсации с более короткими периодами. С достаточной надежностью наблюдались колебания с частотой 2 Гц, но, возможно, существуют пульсации и с большей частотой. Амплитуда быстрых пульсаций очень мала - порядка 0,1 гаммы или меньше. Для их измерения используется катушка с большим числом витков проволоки (до 20 000) или огромная проволочная петля, охватывающая площадь 50-75 км<sup>2</sup>, а также квантовые магнитометры.

В авроральных зонах и вблизи них выявлены гигантские микропульсации с амплитудой, значительно большей, чем у *Pc*, достигающей нескольких десятков гамм. Огибающая гигантской микропульсации постепенно возрастает и уменьшается с периодом от одной до нескольких минут. В авроральной зоне также выявлены пульсации с периодами в несколько минут, некоторые из них состоят из нескольких почти синусоидальных колебаний, продолжающихся в течение нескольких часов. Наиболее часто они возникают в годы высокой солнечной активности. В авроральной зоне наблюдаются и более быстрые микропульсации с периодом от нескольких секунд до 30 с, связанные, по-видимому, с авроральной активностью. Феномен гигантских микропульсаций не вполне исследован. Высказывается предположение, что некоторые их типы обусловлены колебаниями магнитных силовых линий во внешней области атмосферы Земли.

**Геомагнитное поле в высоких слоях атмосферы.** С началом запуска ракет и спутников в высокие слои атмосферы геомагнитное поле стало предметом пристального интереса. Раньше полагали, что земное магнитное поле простирается на большие расстояния. Л.Бирман предположил, что хвосты комет, состоящие из ионов, вытягиваются в сторону от Солнца под напором непрерывно испускаемого им потока заряженных частиц. По его расчетам, плотность ион-электронных пар вблизи Земли составляет ок. 100/см<sup>3</sup>. Идея была поддержана Е.Паркером, который назвал этот непрерывный корпускулярный поток "солнечным ветром". По его расчетам, если солнечный ветер действительно существует, земное магнитное поле должно быть сосредоточено в ограниченной области вокруг Земли, размер и форма которой зависят от силы солнечного ветра. Согласно данным магнитометра, установленного на космическом аппарате "Пионер-1" (1958), граница земного магнитного поля в направлении Солнца находится на расстоянии ок. 80 000 км от Земли (магнитосфера Земли). За пределами этой зоны зарегистрировано магнитное поле интенсивностью порядка 10 нТ. В межзвездном пространстве существует магнитное поле порядка 0,1 нТ.

Важное открытие было сделано группой ученых под рук. Дж.Ван Аллена в 1958. С помощью приборов, установленных на первом в США спутнике "Эксплорер-1", они обнаружили, что во внешней атмосфере Земли существует радиация высокой интенсивности. Измерения, сделанные с советских спутников под руководством С.Н.Вернова и А.Е.Чудакова (1958), выявили вторую зону радиации. Эти зоны получили название радиационных поясов, или поясов Ван Аллена. Первый пояс простирается от 960 до 8000 км над земной поверхностью; второй -- от 16 000 до 64 000 км. В пределах внутреннего пояса имеются протоны с высокой энергией. Протоны малой энергии и электроны заполняют более обширную область. Захват заряженных частиц земным магнитным полем впоследствии был проверен в экспериментах "Аргус" (1958), когда с помощью ядерного взрыва на больших высотах во внешние слои атмосферы были искусственно введены электроны. Оказалось, что захваченные электроны остаются в тонкой оболочке магнитосферы в течение нескольких дней.

**Земные токи.** Земные, или теллурические, токи текут в приповерхностном слое земной коры. Косвенно об их существовании можно заключить на основе измерений потенциометром разности потенциалов между двумя электродами, помещенными в грунт. Измеренная разность потенциалов представляет собой электродвижущую силу, возникающую в результате электрических токов, величина которых зависит от сопротивления коры. Величина сопротивления (от 100 до нескольких миллионов и более Ом·см) зависит от геологической структуры и заметно меняется с глубиной. Поскольку верхний слой коры земной обладает электропроводностью, меняющееся магнитное поле индуцирует в нем электрические токи. Например, магнитная вариация  $S_q$  индуцирует глобальные земные токи. Поскольку сопротивление Земли не изотропно, земные токи обладают преимущественным направлением.

Исследование земных токов в авроральных зонах служит хорошим индикатором полярных возмущений, а также полезны для изучения микропульсаций.

## Глава 4.

# МАГНИТЫ И МАГНИТНЫЕ СВОЙСТВА ВЕЩЕСТВА

Простейшие проявления магнетизма известны очень давно и знакомы большинству из нас. Однако объяснить эти, казалось бы, простые явления на основе фундаментальных принципов физики удалось лишь сравнительно недавно.

Существуют магниты двух разных видов. Одни — так называемые постоянные магниты, изготавливаемые из "магнитно-твердых" материалов. Их магнитные свойства не связаны с использованием внешних источников или токов. К другому виду относятся так называемые электромагниты с сердечником из "магнитно-мягкого" железа. Создаваемые ими магнитные поля обусловлены в основном тем, что по проводу обмотки, охватывающей сердечник, проходит электрический ток.

### 4.1. Магнитные полюса и магнитное поле

Магнитные свойства стержневого магнита наиболее заметны вблизи его концов. Если такой магнит подвесить за среднюю часть так, чтобы он мог свободно поворачиваться в горизонтальной плоскости, то он займет положение, примерно соответствующее направлению с севера на юг. Конец стержня, указывающий на север, называют северным полюсом, а противоположный конец — южным полюсом. Разноименные полюса двух магнитов притягиваются друг к другу, а одноименные взаимно отталкиваются.

Если к одному из полюсов магнита приблизить брусок ненамагниченного железа, то последний временно намагнитится. При этом ближний к полюсу магнита полюс намагниченного бруска будет противоположным по наименованию, а дальний — одноименным. Притяжением между полюсом магнита и индуцированным им в бруске противоположным полюсом и объясняется действие магнита. Некоторые материалы (например, сталь) сами становятся слабыми постоянными магнитами после того, как побывают около постоянного магнита или электромагнита. Стальной стержень можно намагнитить, просто проведя по его торцу концом стержневого постоянного магнита.

Итак, магнит притягивает другие магниты и предметы из магнитных материалов, не находясь в соприкосновении с ними. Такое действие на расстоянии объясняется существованием в пространстве вокруг магнита магнитного поля. Некоторое представление об интенсивности и направлении этого магнитного поля можно получить, насыпав на лист картона или стекла, положенный

на магнит, железные опилки. Опилки выстроятся цепочками в направлении поля, а густота линий из опилок будет соответствовать интенсивности этого поля. (Гуще всего они у концов магнита, где интенсивность магнитного поля наибольшая.)

М.Фарадей (1791-1867) ввел для магнитов понятие замкнутых линий индукции. Линии индукции выходят в окружающее пространство из магнита у его северного полюса, входят в магнит у южного полюса и проходят внутри материала магнита от южного полюса обратно к северному, образуя замкнутую петлю. Полное число линий индукции, выходящих из магнита, называется магнитным потоком. Плотность магнитного потока, или магнитная индукция ( $B$ ), равна числу линий индукции, проходящих по нормали через элементарную площадку единичной величины.

Магнитной индукцией определяется сила, с которой магнитное поле действует на находящийся в нем проводник с током. Если проводник, по которому проходит ток  $I$ , расположен перпендикулярно линиям индукции, то по закону Ампера сила  $F$ , действующая на проводник, перпендикулярна и полю, и проводнику и пропорциональна магнитной индукции, силе тока и длине проводника. Таким образом, для магнитной индукции  $B$  можно написать выражение

$$B = \frac{F}{Il},$$

где  $F$  — сила в ньютонах,  $I$  — ток в амперах,  $l$  — длина в метрах. Единицей измерения магнитной индукции является тесла (Тл)

*Гальванометр.* Гальванометр — чувствительный прибор для измерения слабых токов. В гальванометре используется вращающий момент, возникающий при взаимодействии подковообразного постоянного магнита с небольшой токнесущей катушкой (слабым электромагнитом), подвешенной в зазоре между полюсами магнита. Вращающий момент, а следовательно, и отклонение катушки пропорциональны току и полной магнитной индукции в воздушном зазоре, так что шкала прибора при небольших отклонениях катушки почти линейна.

## 4.2. Намагничивающая сила и напряженность магнитного поля

Далее следует ввести еще одну величину, характеризующую магнитное действие электрического тока. Предположим, что ток проходит по проводу длиной катушки, внутри которой расположен намагничиваемый материал. Намагничивающей силой называется произведение электрического тока в катушке на число ее витков (эта сила измеряется в амперах, так как число витков — величина безразмерная). Напряженность магнитного поля  $H$  равна намагничивающей силе, приходящейся на единицу длины катушки. Таким образом, величина  $H$  измеряется в амперах на метр; ею определяется намагниченность, приобретаемая материалом внутри катушки.

В вакууме магнитная индукция  $B$  пропорциональна напряженности магнитного поля  $H$ :

$$B = \mu_0 H$$

где  $\mu_0$  — т.н. магнитная постоянная, имеющая универсальное значение  $4 \cdot 10^{-7}$  Гн/м. Во многих материалах величина  $B$  приблизительно пропорциональна  $H$ , Однако в ферромагнитных материалах соотношение между  $B$  и  $H$  несколько сложнее (о чем будет сказано ниже).

На рис. 4.2.1 изображен простой электромагнит, предназначенный для захвата грузов. Источником энергии служит аккумуляторная батарея постоянного тока. На рисунке показаны также силовые линии поля электромагнита, которые можно выявить обычным методом железных опилок.

Крупные электромагниты с железными сердечниками и очень большим числом ампер-витков, работающие в непрерывном режиме, обладают большой намагничивающей силой. Они создают магнитную индукцию до 6 Тл в промежутке между полюсами; эта индукция ограничивается лишь механическими напряжениями, нагреванием катушек и магнитным насыщением сердечника, Ряд гигантских электромагнитов (без сердечника) с водяным охлаждением, а также установок для создания импульсных магнитных полей был сконструи-

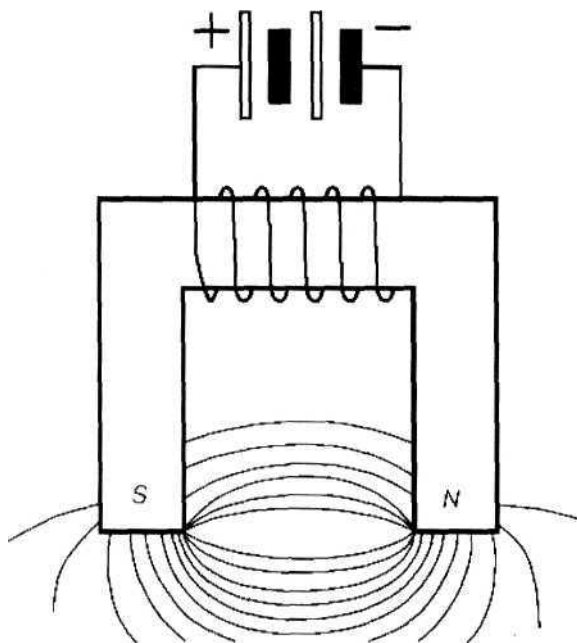


Рис. 4.2.1. Электромагнит создает магнитное поле благодаря электрическому току в обмотке



рован П.Л.Капицей (1894-1984) в Кембридже и в Институте физических проблем АН СССР и Ф.Биттером (1902-1967) в Массачусетском технологическом институте. На таких магнитах удавалось достичь индукции до 50 Тл. Сравнительно небольшой электромагнит, создающий поля до 6,2 Тл, потребляющий электрическую мощность 15 кВт и охлаждаемый жидким водородом, был разработан в Лосаламосской национальной лаборатории. Подобные поля получают при криогенных температурах.

### 4.3. Магнитная проницаемость и ее роль в магнетизме

Магнитная проницаемость  $\mu$  — это величина, характеризующая магнитные свойства материала. Ферромагнитные металлы *Fe*, *Ni*, *Co* и их сплавы обладают очень высокими максимальными проницаемостями — от 5000 (для *Fe*) до 800 000 (для супермаллоя). В таких материалах при сравнительно малых напряженностях поля  $H$  возникают большие индукции  $B$ , но связь между этими величинами, вообще говоря, нелинейна из-за явлений насыщения и гистерезиса, о которых говорится ниже. Ферромагнитные материалы сильно притягиваются магнитами. Они теряют свои магнитные свойства при температурах выше точки Кюри (770°C для *Fe*, 358°C для *Ni*, 1120°C для *Co*) и ведут себя как парамагнетики, для которых индукция  $B$  вплоть до очень высоких значений напряженности  $H$  пропорциональна ей — в точности так же, как это имеет место в вакууме. Многие элементы и соединения являются парамагнитными при всех температурах. Парамагнитные вещества характеризуются тем, что намагничиваются во внешнем магнитном поле; если же это поле выключить, парамагнетики возвращаются в ненамагниченное состояние. Намагниченность в ферромагнетиках сохраняется и после выключения внешнего поля.

На рис. 4.3.1 представлена типичная петля гистерезиса для магнитно-твердого (с большими потерями) ферромагнитного материала. Она характеризует неоднозначную зависимость намагниченности магнитоупорядоченного материала от напряженности намагничивающего поля. С увеличением напряженности магнитного поля от исходной (нулевой) точки (1) намагничивание идет по штриховой линии 1-2, причем величина — существенно изменяется по мере того, как возрастает намагниченность образца. В точке 2 достигается насыщение, т.е. при дальнейшем увеличении напряженности намагниченность больше не увеличивается. Если теперь постепенно уменьшать величину  $H$  до нуля, то кривая  $B(H)$  уже не следует по прежнему пути, а проходит через точку 3, обнаруживая как бы "память" материала о "прошлой истории", откуда и название "гистерезис". Очевидно, что при этом сохраняется некоторая остаточная намагниченность (отрезок 1-3). После изменения направления намагничивающего поля на обратное кривая  $B(H)$  проходит точку 4, причем отрезок (1)-(4) соответствует коэрцитивной силе, препятствующей размагничиванию. Дальнейший рост значений  $(H)$  приводит кривую гистерезиса в третий квадрант — участок 4-5. Следующее за этим уменьшение величины  $(H)$  до нуля и затем

возрастание положительных значений  $H$  приведет к замыканию петли гистерезиса через точки 6, 7 и 2.

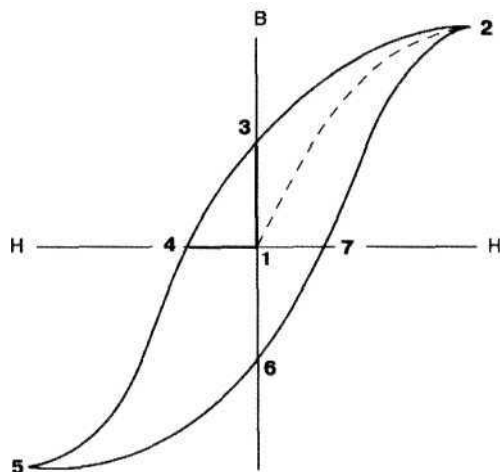


Рис. 4.3.1. Типичная петля гистерезиса для магнитно-твёрдого ферромагнитного материала. В точке 2 достигается магнитное насыщение. Отрезок 1-3 определяет остаточную магнитную индукцию, а отрезок 1-4 — коэрцитивную силу, характеризующую способность образца противостоять размагничиванию

Магнитно-твёрдые материалы характеризуются широкой петлей гистерезиса, охватывающей значительную площадь на диаграмме и потому соответствующей большим значениям остаточной намагниченности (магнитной индукции) и коэрцитивной силы. Узкая петля гистерезиса (рис. 4.3.2) характерна для магнитно-мягких материалов — таких, как мягкая сталь и специальные сплавы с большой магнитной проницаемостью. Такие сплавы и были созданы с целью снижения обусловленных гистерезисом энергетических потерь. Большинство подобных специальных сплавов, как и ферриты, обладают высоким электрическим сопротивлением, благодаря чему уменьшаются не только магнитные потери, но и электрические, обусловленные вихревыми токами.

Магнитные материалы с высокой проницаемостью изготавливаются путем отжига, осуществляемого выдерживанием при температуре около  $1000^{\circ}\text{C}$ , с последующим отпуском (постепенным охлаждением) до комнатной температуры. При этом очень существенны предварительная механическая и термическая обработка, а также отсутствие в образце примесей. Для сердечников трансформаторов в начале 20 в. были разработаны кремнистые стали, величина — которых возрастала с увеличением содержания кремния. Между 1915 и 1920 появились пермаллои (сплавы  $Ni$  с  $Fe$ ) с характерной для них узкой и почти прямоугольной петлей гистерезиса. Особенно высокими значениями магнитной проницаемости — при малых значениях  $H$  отличаются сплавы гиперник

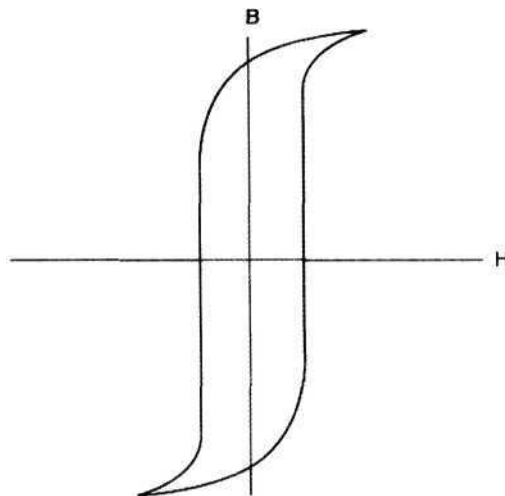


Рис. 4.3.2. Типичная петля гистерезиса для магнитно-мягкого материала (например, железа). Поскольку площадь петли пропорциональна потерям энергии, такие материалы слабо сопротивляются размагничиванию и характеризуются малыми потерями энергии

(50% *Ni*, 50% *Fe*) и му-металл (75% *Ni*, 18% *Fe*, 5% *Cu*, 2% *Cr*), тогда как в перминваре (45% *Ni*, 30% *Fe*, 25% *Co*) величина — практически постоянна в широких пределах изменения напряженности поля. Среди современных магнитных материалов следует упомянуть супермаллой -- сплав с наивысшей магнитной проницаемостью (в его состав входит 79% *Ni*, 15% *Fe* и 5% *Mo*).

## 4.4. Теории магнетизма

Впервые догадка о том, что магнитные явления в конечном счете сводятся к электрическим, возникла у Ампера в 1825, когда он высказал идею замкнутых внутренних микротоков, циркулирующих в каждом атоме магнита. Однако без какого-либо опытного подтверждения наличия в веществе таких токов (электрон был открыт Дж.Томсоном лишь в 1897, а описание структуры атома было дано Резерфордом и Бором в 1913) эта теория "увяла". В 1852 В.Вебер высказал предположение, что каждый атом магнитного вещества представляет собой крошечный магнит, или магнитный диполь, так что полная намагниченность вещества достигается, когда все отдельные атомные магниты оказываются выстроенными в определенном порядке (рис. 4.4.1,6). Вебер полагал, что сохранять свое упорядочение вопреки возмущающему влиянию тепловых колебаний этим элементарным магнитам помогает молекулярное или атомное "трение". Его теория смогла объяснить намагничивание тел при соприкосновении с магнитом, а также их размагничивание при ударе или нагреве; наконец, объяснялось и "размножение" магнитов при разрезании намагниченной иглы или магнитного стержня на части. И все же эта теория не объясняла ни

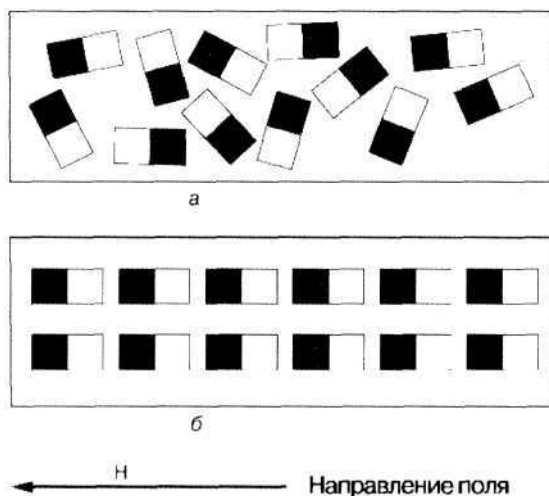


Рис. 4.4.1. Ранняя теория магнетизма: предполагалось, что вещество намагничивается, когда его отдельные атомы (каждый из которых является маленьким магнитом), в отсутствие поля расположенные хаотически (а), под действием внешнего поля располагаются в определенном порядке (б)

происхождения самих элементарных магнитов, ни явлении насыщения и гистерезиса. Теория Вебера была усовершенствована в 1890 Дж.Эвингом, заменившим его гипотезу атомного трения идеей межатомных ограничивающих сил, помогающих поддерживать упорядочение элементарных диполей, которые составляют постоянный магнит.

Подход к проблеме, предложенный когда-то Ампером, получил вторую жизнь в 1905, когда П.Ланжевен объяснил поведение парамагнитных материалов, приписав каждому атому внутренний нескомпенсированный электронный ток. Согласно Ланжевону, именно эти токи образуют крошечные магниты, хаотически ориентированные, когда внешнее поле отсутствует, но приобретающие упорядоченную ориентацию после его приложения. При этом приближение к полной упорядоченности соответствует насыщению намагниченности. Кроме того, Ланжевен ввел понятие магнитного момента, равного для отдельного атомного магнита произведению "магнитного заряда" полюса на расстояние между полюсами. Таким образом, слабый магнетизм парамагнитных материалов обусловлен суммарным магнитным моментом, создаваемым нескомпенсированными электронными токами.

В 1907 П.Вейс ввел понятие "домена", ставшее важным вкладом в современную теорию магнетизма. Вейс представлял домены в виде небольших "колоний" атомов, в пределах которых магнитные моменты всех атомов в силу каких-то причин вынуждены сохранять одинаковую ориентацию, так что каждый домен намагничен до насыщения. Отдельный домен может иметь линейные размеры порядка 0,01 мм и соответственно объем порядка  $10^{-6}$  мм<sup>3</sup>.

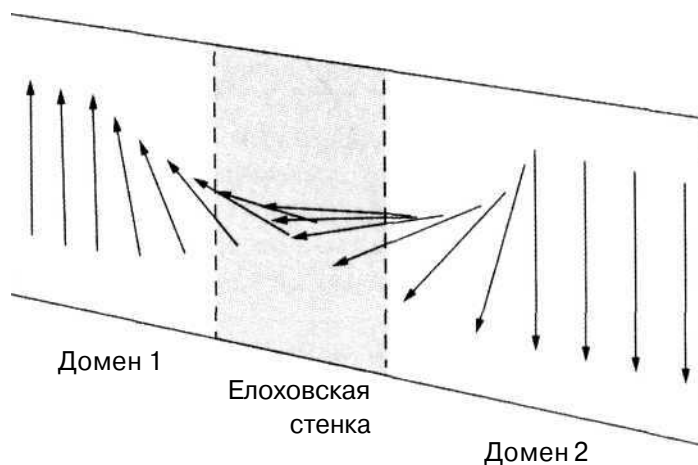


Рис. 4.4.2. Домен в теории магнетизма — это малая намагниченная область материала, в которой моменты атомов параллельны друг другу. Домены отделены друг от друга переходным слоем, называемым блоховской стенкой. Показаны два домена с противоположной ориентацией и блоховская стенка с промежуточной ориентацией

Домены разделены так называемыми блоховскими стенками, толщина которых не превышает 1000 атомных размеров. "Стенка" и два противоположно ориентированных домена схематически изображены на рис. 4.4.2. Такие стенки представляют собой "переходные слои", в которых происходит изменение направления намагниченности доменов.

В общем случае на кривой первоначального намагничивания можно выделить три участка (рис. 4.4.3.). На начальном участке стенка под действием внешнего поля движется сквозь толщу вещества, пока не встретит дефект кристаллической решетки, который ее останавливает. Увеличив напряженность поля, можно заставить стенку двигаться дальше, через средний участок между штриховыми линиями. Если после этого напряженность поля вновь уменьшить до нуля, то стенки уже не вернуться в исходное положение, так что образец останется частично намагниченным. Этим объясняется гистерезис магнита. На конечном участке кривой процесс завершается насыщением намагниченности образца за счет упорядочения намагниченности внутри последних неупорядоченных доменов. Такой процесс почти полностью обратим. Магнитную твердость проявляют те материалы, у которых атомная решетка содержит много дефектов, препятствующих движению междоменных стенок. Этого можно достичь механической и термической обработкой, например путем сжатия и последующего спекания порошкообразного материала. В сплавах алнико и их аналогах тот же результат достигается путем сплавления металлов в сложную структуру.



Рис. 4.4.3. Кривая намагничивания и доминирующие процессы на разных ее участках

Кроме парамагнитных и ферромагнитных материалов, существуют материалы с так называемыми антиферромагнитными и ферримагнитными свойствами. Различие между этими видами магнетизма поясняется на рис. 4.4.4. Исходя из представления о доменах, парамагнетизм можно рассматривать как явление, обусловленное наличием в материале небольших групп магнитных диполей, в которых отдельные диполи очень слабо взаимодействуют друг с другом (или вообще не взаимодействуют) и потому в отсутствие внешнего поля принимают лишь случайные ориентации (рис. 4.4.4,а). В ферромагнитных

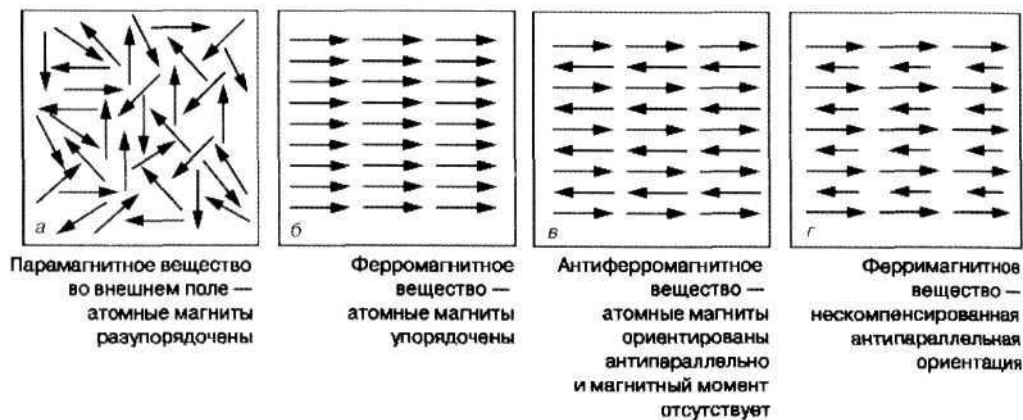


Рис. 4.4.4. Типы упорядочения магнитных моментов атомов в парамагнитных (а), ферромагнитных (б), антиферромагнитных (в) и ферримагнитных (г) веществах

же материалах в пределах каждого домена существует сильное взаимодействие между отдельными диполями, приводящее к их упорядоченному параллельному выстраиванию (рис. 4.4.4,б). В антиферромагнитных материалах, напротив, взаимодействие между отдельными диполями приводит к их антипараллельному упорядоченному выстраиванию, так что полный магнитный момент каждого домена равен нулю (рис. 4.4.4,в). Наконец, в ферромагнитных материалах (например, ферритах) имеется как параллельное, так и антипараллельное упорядочение (рис. 4.4.4,г), итогом чего оказывается слабый магнетизм.

Имеются два убедительных экспериментальных подтверждения существования доменов. Первое из них — так называемый эффект Баркгаузена, второе — метод порошковых фигур. В 1919 г. Баркгаузен установил, что при наложении внешнего поля на образец из ферромагнитного материала его намагниченность изменяется небольшими дискретными порциями. С точки зрения доменной теории это не что иное, как скачкообразное продвижение междоменной стенки, встречающей на своем пути отдельные задерживающие ее дефекты. Данный эффект обычно обнаруживается с помощью катушки, в которую помещается ферромагнитный стерженек или проволока. Если поочередно подносить к образцу и удалять от него сильный магнит, образец будет намагничиваться и перемагничиваться. Скачкообразные изменения намагниченности образца изменяют магнитный поток через катушку, и в ней возбуждается индукционный ток. Напряжение, возникающее при этом в катушке, усиливается и подается на вход пары акустических наушников. Щелчки, воспринимаемые через наушники, свидетельствует о скачкообразном изменении намагниченности.

Для выявления доменной структуры магнита методом порошковых фигур на хорошо отполированную поверхность намагниченного материала наносят каплю коллоидной суспензии ферромагнитного порошка (обычно  $Fe_3O_4$ ). Частицы порошка оседают в основном в местах максимальной неоднородности магнитного поля — на границах доменов. Такую структуру можно изучать под микроскопом. Был предложен также метод, основанный на прохождении поляризованного света сквозь прозрачный ферромагнитный материал.

Первоначальная теория магнетизма Вейса в своих основных чертах сохранила свое значение до настоящего времени, получив, однако, обновленную интерпретацию на основе представления о нескомпенсированных электронных спинах как факторе, определяющем атомный магнетизм. Гипотеза о существовании собственного момента у электрона была выдвинута в 1926 С.Гаудсмитом и Дж.Уленбеком, и в настоящее время в качестве "элементарных магнитов" рассматриваются именно электроны как носители спина.

Для пояснения этой концепции рассмотрим (рис. 4.4.5.) свободный атом железа — типичного ферромагнитного материала. Две его оболочки ( $K$  и  $L$ ), ближайшие к ядру, заполнены электронами, причем на первой из них размещены два, а на второй -- восемь электронов. В  $K$ -оболочке спин одного из электронов положителен, а другого — отрицателен. В  $L$ -оболочке (точнее, в

двух ее подоболочках) у четырех из восьми электронов положительные, а у других четырех — отрицательные спины. В обоих случаях спины электронов в пределах одной оболочки полностью компенсируются, так что полный магнитный момент равен нулю. В М-оболочке ситуация иная, поскольку из шести электронов, находящихся в третьей подоболочке, пять электронов имеют спины, направленные в одну сторону, и лишь шестой — в другую. В результате остаются четыре нескомпенсированных спина, чем и обусловлены магнитные свойства атома железа. (Во внешней N-оболочке всего два валентных электрона, которые не дают вклада в магнетизм атома железа.) Сходным образом объясняется магнетизм и других ферромагнетиков, например никеля и кобальта. Поскольку соседние атомы в образце железа сильно взаимодействуют друг с другом, причем их электроны частично коллективизируются, такое объяснение следует рассматривать лишь как наглядную, но весьма упрощенную схему реальной ситуации.

Теорию атомного магнетизма, основанную на учете спина электрона, подкрепляют два интересных гиромангнитных эксперимента, один из которых был проведен А.Эйнштейном и В.де Гаазом, а другой — С.Барнеттом. В первом из этих экспериментов цилиндр из ферромагнитного материала подвешивался так, как показано на рис. 4.4.6. Если по проводу обмотки пропустить ток, то цилиндр поворачивается вокруг своей оси. При изменении направления тока (а следовательно, и магнитного поля) он поворачивается в обратном

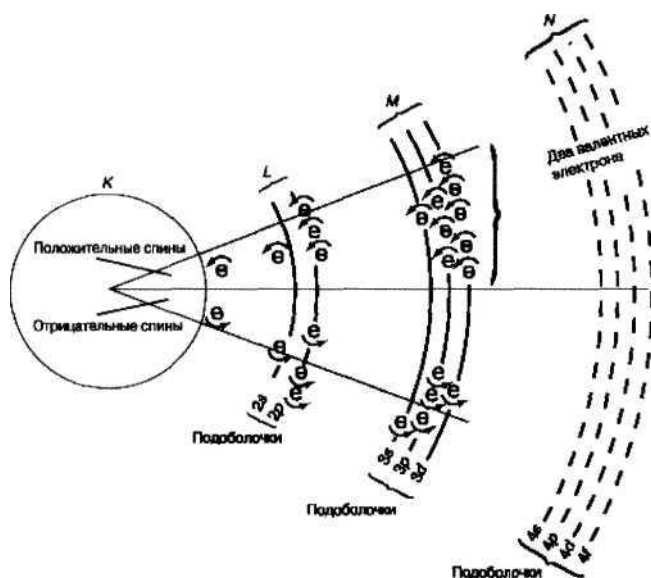


Рис. 4.4.5. Некомпенсированные электронные спины как причина магнетизма. Изображены оболочки и подоболочки свободного атома железа, имеющего четыре нескомпенсированных электронных спина в 3d-подоболочке М-оболочки, которыми и обусловлены магнитные свойства железа



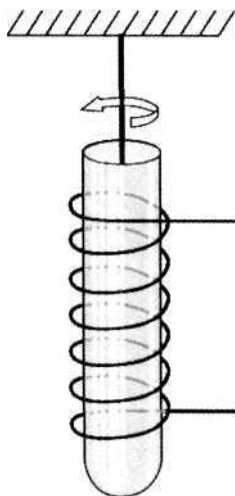


Рис. 4.4.6. Эксперимент Эйнштейна — Де-Гааза. При пропускании тока по обмотке, охватывающей ферромагнитный цилиндр, последний поворачивается в направлении стрелки. Если изменить направление тока, то цилиндр поворачивается в другую сторону

направлении. В обоих случаях вращение цилиндра обусловлено упорядочением электронных спинов. В эксперименте Барнетта, наоборот, так же подвешенный цилиндр, резко приведенный в состояние вращения, в отсутствие магнитного поля намагничивается. Этот эффект объясняется тем, что при вращении магнетика создается гироскопический момент, стремящийся повернуть спиновые моменты по направлению собственной оси вращения.

За более полным объяснением природы и происхождения короткодействующих сил, упорядочивающих соседние атомные магнетики и противодействующих разупорядочивающему влиянию теплового движения, следует обратиться к квантовой механике. Квантово-механическое объяснение природы этих сил было предложено в 1928 В.Гейзенбергом, который постулировал существование обменных взаимодействий между соседними атомами. Позднее Г.Бете и Дж.Слэтер показали, что обменные силы существенно возрастают с уменьшением расстояния между атомами, но по достижении некоторого минимального межатомного расстояния падают до нуля.

## 4.5. Магнитные свойства вещества

Одно из первых обширных и систематических исследований магнитных свойств вещества было предпринято П.Кюри. Он установил, что по своим магнитным свойствам все вещества можно разделить на три класса. К первому относятся вещества с резко выраженными магнитными свойствами, подобными свойствам железа. Такие вещества называются ферромагнитными; их маг-

нитное поле заметно на значительных расстояниях (см. выше). Во второй класс попадают вещества, называемые парамагнитными; магнитные свойства их в общем аналогичны свойствам ферромагнитных материалов, но гораздо слабее. Например, сила притяжения к полюсам мощного электромагнита может вырвать из ваших рук железный молоток, а чтобы обнаружить притяжение парамагнитного вещества к тому же магниту, нужны, как правило, очень чувствительные аналитические весы. К последнему, третьему классу относятся так называемые диамагнитные вещества. Они отталкиваются электромагнитом, т.е. сила, действующая на диамагнетики, направлена противоположно той, что действует на ферро- и парамагнетики.

### 4.5.1. Измерение магнитных свойств

При изучении магнитных свойств наиболее важное значение имеют измерения двух типов. Первый из них — измерения силы, действующей на образец вблизи магнита; так определяется намагниченность образца. Ко второму относятся измерения "резонансных" частот, связанных с намагничиванием вещества. Атомы представляют собой крошечные "гироскопы" и в магнитном поле прецессируют (как обычный волчок под влиянием вращающего момента, создаваемого силой тяжести) с частотой, которая может быть измерена. Кроме того, на свободные заряженные частицы, движущиеся под прямым углом к линиям магнитной индукции, действует сила, как и на электронный ток в проводнике. Она заставляет частицу двигаться по круговой орбите, радиус которой дается выражением

$$R = mv/eB,$$

где  $m$  — масса частицы,  $v$  — ее скорость,  $e$  — ее заряд, а  $B$  — магнитная индукция поля. Частота такого кругового движения равна

$$f = \frac{1}{2\pi} \frac{eB}{m},$$

где  $f$  измеряется в герцах,  $e$  — в кулонах,  $m$  — в килограммах,  $B$  — в теслах. Эта частота характеризует движение заряженных частиц в веществе, находящемся в магнитном поле. Оба типа движений (прецессию и движение по круговым орбитам) можно возбудить переменными полями с резонансными частотами, равными "естественным" частотам, характерным для данного материала. В первом случае резонанс называется магнитным, а во втором — циклотронным (ввиду сходства с циклическим движением субатомной частицы в циклотроне).

Говоря о магнитных свойствах атомов, необходимо особо остановиться на их моменте импульса. Магнитное поле действует на вращающийся атомный диполь, стремясь повернуть его и установить параллельно полю. Вместо этого

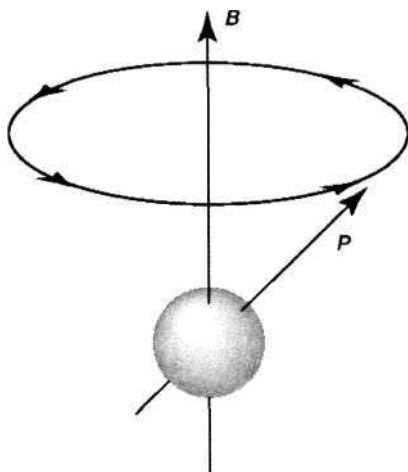


Рис. 4.5.1. Прецессия атома. Атом с магнитным моментом  $p$  прецессирует в магнитном поле с индукцией  $B$

атом начинает прецессировать вокруг направления поля (рис. 4.5.1) с частотой, зависящей от дипольного момента и напряженности приложенного поля.

Прецессия атомов не поддается непосредственному наблюдению, поскольку все атомы образца прецессируют в разной фазе. Если же приложить небольшое переменное поле, направленное перпендикулярно постоянному упорядочивающему полю, то между прецессирующими атомами устанавливается определенное фазовое соотношение и их суммарный магнитный момент начинает прецессировать с частотой, равной частоте прецессии отдельных магнитных моментов. Важное значение имеет угловая скорость прецессии. Как правило, это величина порядка  $10^{10}$  Гц/Тл для намагниченности, связанной с электронами, и порядка  $10^7$  Гц/Тл для намагниченности, связанной с положительными зарядами в ядрах атомов.

Принципиальная схема установки для наблюдения ядерного магнитного резонанса (ЯМР) представлена на рис. 4.5.2. В однородное постоянное поле между полюсами вводится изучаемое вещество. Если затем с помощью небольшой катушки, охватывающей пробирку, возбудить радиочастотное поле, то можно добиться резонанса на определенной частоте, равной частоте прецессии всех ядерных "гироскопов" образца. Измерения сходны с настройкой радиоприемника на частоту определенной станции.

Методы магнитного резонанса позволяют исследовать не только магнитные свойства конкретных атомов и ядер, но и свойства их окружения. Дело в том, что магнитные поля в твердых телах и молекулах неоднородны, поскольку искажены атомными зарядами, и детали хода экспериментальной резонансной кривой определяются локальным полем в области расположения прецессирующего ядра. Это и дает возможность изучать особенности структуры конкретного образца резонансными методами.

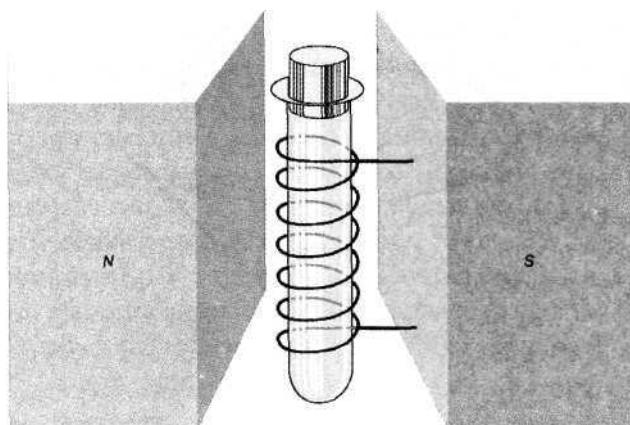


Рис. 4.5.2. Ядерный магнитный резонанс. Исследуемое вещество в стеклянной пробирке помещается в постоянное магнитное поле. В катушке, намотанной на пробирку, возбуждается резонанс на частоте, равной частоте гироскопической прецессии атома в магнитном поле

### 4.5.2. Расчет магнитных свойств

Магнитная индукция поля Земли составляет  $0,5 \cdot 10^{-4}$  Тл, тогда как поле между полюсами сильного электромагнита — порядка 2 Тл и более.

Магнитное поле, создаваемое какой-либо конфигурацией токов, можно вычислить, пользуясь формулой Био-Савара-Лапласа для магнитной индукции поля, создаваемого элементом тока. Расчет поля, создаваемого контурами разной формы и цилиндрическими катушками, во многих случаях весьма сложен. Ниже приводятся формулы для ряда простых случаев. Магнитная индукция (в теслах) поля, создаваемого длинным прямым проводом с током  $I$  (ампер), на расстоянии  $r$  (метров) от провода равна

$$B = \mu_0 \frac{I}{2\pi \cdot r} .$$

Индукция в центре кругового витка радиуса  $R$  с током  $I$  равна (в тех же единицах):

$$B = \mu_0 \frac{I}{2R} .$$

Плотно намотанная катушка провода без железного сердечника называется соленоидом. Магнитная индукция, создаваемая длинным соленоидом с числом витков  $N$  в точке, достаточно удаленной от его концов, равна

$$B = \mu_0 \frac{NI}{L}.$$

Здесь величина  $NI/L$  есть число ампер (ампер-витков) на единицу длины соленоида. Во всех случаях магнитное поле тока направлено перпендикулярно этому току, а сила, действующая на ток в магнитном поле, перпендикулярна и току, и магнитному полю.

Поле намагниченного железного стержня сходно с внешним полем длинного соленоида с числом ампер-витков на единицу длины, соответствующим току в атомах на поверхности намагниченного стержня, поскольку токи внутри стержня взаимно компенсируются (рис. 4.5.3). По имени Ампера такой поверхностный ток называется амперовским. Напряженность магнитного поля  $H_a$ , создаваемая амперовским током, равна магнитному моменту единицы объема стержня  $M$ .

Если в соленоид вставлен железный стержень, то кроме того, что ток соленоида создает магнитное поле  $\mathbf{J}$ , упорядочение атомных диполей в намагниченном материале стержня создает намагниченность  $M$ . В этом случае полный магнитный поток определяется суммой реального и амперовского токов, так что  $B = m_0(H + H_a)$ , или  $B = m_0(H + M)$ . Отношение  $M/H$  называется магнитной восприимчивостью и обозначается греческой буквой  $c$ ;  $c$  — безразмерная величина, характеризующая способность материала намагничиваться в магнитном поле.

Величина  $B/H$ , характеризующая магнитные свойства материала, называется магнитной проницаемостью и обозначается через  $m_a$ , причем  $m_a = m_0 m$ , где  $m_a$  — абсолютная, а  $m$  — относительная проницаемости,

$$m = 1 + c.$$

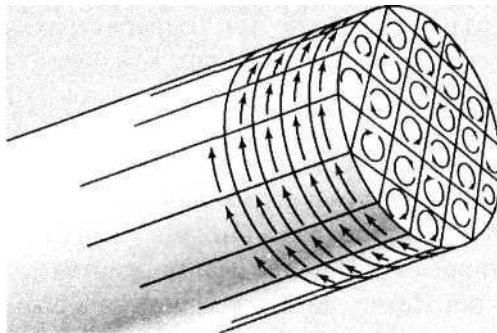


Рис. 4.5.3. Атомные токи внутри намагниченного стержня полностью компенсируют друг друга, так что остается лишь амперовский ток на его поверхности

В ферромагнитных веществах величина  $s$  может иметь очень большие значения -- до  $10^4$ - $10^6$ . Величина  $s$  у парамагнитных материалов немного больше нуля, а у диамагнитных — немного меньше. Лишь в вакууме и в очень слабых полях величины  $s$  и  $m$  постоянны и не зависят от внешнего поля. Зависимость индукции  $B$  от  $H$  обычно нелинейна, а ее графики, т.н. кривые намагничивания, для разных материалов и даже при разных температурах могут существенно различаться (примеры таких кривых приведены на рис. 4.3.1 и 4.3.2).

Магнитные свойства вещества весьма сложны, и для их глубокого понимания необходим тщательный анализ строения атомов, их взаимодействий в молекулах, их столкновений в газах и их взаимного влияния в твердых телах и жидкостях; магнитные свойства жидкостей пока наименее изучены.

## Литература

1. Карцев В.П. Магнит за три тысячелетия. М., 1972
2. Ахиезер А.И. Общая физика.. Электрические и магнитные явления, Киев, 1981
3. Мишин Д.Д. Магнитные материалы. М., 1981
4. Каганов М.И., Цукерник В.М. Природа магнетизма. М., 1982
5. Белов К.П., Бочкарев Н.Г. Магнетизм на Земле и в космосе. М., 1983
6. Вонсовский С.В. Магнетизм. М., 1984
7. Мнееян М.Г. Новые профессии магнита. М., 1985

## 4.6. Доменные свойства магнитов

### Введение

Как известно, в ферромагнитных веществах магнитные моменты атомов благодаря обменному взаимодействию при температурах, меньших некоторой критической температуры (температуры Кюри  $T_c$ ), ориентируются параллельно друг другу. В связи с этим любой ферромагнетик при  $T < T_c$  должен обладать макроскопическим магнитным моментом или намагниченностью (магнитным моментом единицы объема ферромагнетика). Обменное взаимодействие по своей природе является чисто квантовомеханическим эффектом, поэтому не поддается толкованию в терминах классической физики. Тем не менее можно попытаться интерпретировать обменное взаимодействие, если учесть квантовомеханический принцип Паули, который вводится в школьном курсе химии для объяснения строения электронных оболочек атомов. Согласно принципу Паули, в атоме в одном квантовом состоянии может находиться не более двух электронов с противоположно направленными спинами (собственными моментами количества движения электронов). Если теперь расширить этот принцип на молекулы и твердые тела, то можно объяснить природу обменного

взаимодействия следующим образом. Допустим, что два соседних атома имеют по электрону с неспаренными спинами. Если спины этих электронов антипараллельны, то квантовые состояния, в которых находятся электроны в атомах, могут перекрываться и образовывать в результате как бы одно общее состояние. В случае же, когда спины параллельны, электроны, отталкиваясь из-за принципа Паули, вынуждены оставаться в индивидуальных квантовых состояниях. Из сравнения этих двух случаев следует, что поскольку распределение электронов в них отличается, то естественно, что разным будет и электростатическое взаимодействие между ними. Таким образом, отсюда следует, что энергия твердого тела зависит от ориентации спинов (или магнитных моментов, так как с каждым спином связан магнитный момент) электронов и атомов. Часть энергии, зависящая от взаимной ориентации магнитных моментов атомов твердого тела, называется энергией обменного взаимодействия.

В ферромагнетиках обменная энергия минимальна при параллельной ориентации собственных магнитных моментов электронов, что и приводит к появлению спонтанной намагниченности при  $T < T_c$ .

Обменное взаимодействие изотропно по своей природе (примите на веру, так как и это свойство можно объяснить лишь с позиций квантовой физики). Если учитывать только такой вид взаимодействий в ферромагнетике, то намагниченность в нем может быть направлена в произвольном направлении. Однако любое кристаллическое твердое тело является анизотропным. Из-за анизотропии свойств ферромагнетика вектор намагниченности в нем выстраивается не произвольно, а в строго определенных направлениях. Обычно это направления, соответствующие кристаллографическим осям. Так, например, в кубических ферромагнетиках вектор намагниченности может быть направлен вдоль ребра куба, диагонали грани куба или главной диагонали куба. В одноосных кристаллах намагниченность может быть направлена либо вдоль анизотропии (ферромагнетик типа легкая ось — ФЛО), либо в плоскости, перпендикулярной оси анизотропии (ферромагнетики типа легкая плоскость — ФЛП).

Обменное взаимодействие с макроскопической точки зрения принято описывать обменной энергией  $W_e$ , а анизотропию свойств ферромагнетика — энергией анизотропии  $W_a$ . Ясно, что обе эти энергии должны зависеть от намагниченности ферромагнетика. В связи с этим запишем выражения для  $W_e$  и  $W_a$  в виде разложения по степеням компонент вектора намагниченности. Для примера ограничимся случаем одноосного ферромагнетика. Тогда,

$$W_e = \frac{\alpha M^2}{2} + \dots \quad (1)$$

$$W_a = \frac{\beta M^2}{2} + \dots, \quad (2)$$

где  $\alpha$  и  $\beta$  — коэффициенты разложения. Они называются соответственно постоянными обмена и анизотропии.

При записи (1), (2) учитывался тот факт, что обменное взаимодействие изотропно (это приводит к тому, что обменная энергия должна зависеть только от модуля намагниченности, а не от ее направления) и что вектор намагниченности - аксиальный вектор. Аксиальный вектор характеризует вращение вокруг некоторой оси. Его изображают отрезком прямой, направленной параллельно оси с указанием направления вращения вокруг оси. Длина отрезка при этом должна быть пропорциональна длине аксиального вектора. Направление же его в пространстве определяется по правилу буравчика. Примером аксиальных векторов из школьного курса физики служат угловая скорость, момент силы и индукция магнитного поля.

В разделе посвященном свойствам магнитного поля были введены замкнутые круговые молекулярные токи Ампера. Молекулярному току можно сопоставить вектор элементарного магнитного момента. Его направление в пространстве определяется поступательным движением правого буравчика, если ручку буравчика вращать по направлению течения кругового тока (рис. 4.6.1). Величина магнитного момента такого тока пропорциональна произведению силы тока на площадь окружности, обтекаемую током. Введенная выше намагниченность равна среднему суммарному магнитному моменту молекулярных токов в единице объема вещества. Теперь представьте себе, что время потекло в обратном направлении (время повернуло вспять, то есть изменился знак у  $t$  с  $+$  на  $-$ ). В этом случае скорость меняет знак и частицы, составляющие молекулярный ток, будут двигаться в противоположную сторону, следовательно, изменится и направление течения тока, а значит, и направление магнитного момента элементарного тока, а также и намагниченности тела.

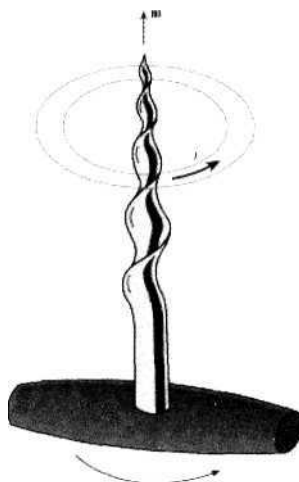


Рис. 4.6.1. Правило правого буравчика. Если ручку буравчика (винта с правой резьбой) вращать по направлению течения кругового тока  $I$ , то поступательное движение острия буравчика определит направление магнитного момента кругового тока



Энергия любого вещества является всегда положительной величиной. Отсюда следует, что в разложениях (1) и (2) должны быть оставлены только четные степени намагниченности. Отметим, что выражения (1) и (2) носят приближенный характер, так как представляют собой первые члены разложения этих энергий по степеням намагниченности.

Каждый реальный ферромагнетик представляет собой ограниченный образец. Из-за обменного взаимодействия такой образец при  $T < T_c$  будет постоянным магнитом. Это приведет к тому, что образец будет создавать вокруг себя магнитное поле, с которым связана некоторая энергия, называемая энергией магнитодипольного взаимодействия  $W_m$ . Такое название происходит от слов "магнитный диполь" — два магнитных полюса (северный и южный), разведенных на небольшое расстояние друг относительно друга (по сравнению с расстоянием до точки наблюдения). Этот вид энергии ферромагнетика еще называют энергией размагничивающих полей из-за того, что вектор индукции магнитного поля вне образца в основном направлен против вектора намагниченности. В случае, когда образец намагничен до насыщения (все магнитные моменты атомов выстроены параллельно друг другу), энергия  $W_m$  пропорциональна объему ферромагнетика. В произвольном же случае  $W_m$  пропорциональна индукции магнитного поля вне образца (индукции размагничивающих полей).

Конкуренцией указанных выше трех взаимодействий и определяется магнитная структура реальных ферромагнетиков. Эта конкуренция, в частности, приводит в реальных ферромагнитных образцах к существованию доменов — областей спонтанного намагничивания. Доменная структура реальных образцов может быть весьма сложной. Она зависит от анизотропии кристалла, его размеров и формы. Многообразие видов доменной структуры и ее чувствительность к внешним воздействиям (например, к внешнему магнитному полю) в основном обусловлены тем, что она формируется благодаря магнитодипольному взаимодействию. В частности, магнитодипольную энергию можно практически сделать равной нулю, если замкнуть силовые линии магнитного поля внутри образца через поверхностные замыкающие домены. В каждом конкретном образце ферромагнетика формируется такая доменная структура, которая соответствует минимуму суммарной энергии: обменной, анизотропии, магнитодипольной плюс, конечно же, энергии доменных стенок. При этом силовые линии магнитного поля могут как замыкаться внутри образца, так и выходить на его поверхность и создавать магнитное поле вне ферромагнетика.

## Немного истории

Существование ферромагнитных доменов впервые было постулировано П. Вейссом в 1907 году. Он ввел это понятие для объяснения размагниченного состояния реальных ферромагнитных образцов. Согласно гипотезе Вейсса, если образец не помещен во внешнее магнитное поле, то он разбивается на области, или домены (от лат. domain — область), намагниченные до насыще-

ния. Домены отделены друг от друга доменными границами. Каждый домен намагничен до насыщения. В соседних доменах намагниченность направлена в разные стороны, поэтому намагниченность всего образца может быть меньше максимальной или равной нулю. В доменных границах намагниченность разворачивается от направления в первом домене к направлению во втором домене. Надо отметить, что наличие доменов с противоположными направлениями намагниченности обусловлено изотропией обменной энергии (1) и равенством энергий анизотропии (2) для состояний с направлением, параллельным, например, оси  $Z$ , и с, антипараллельным этой оси (в случае ФЛО).

Гипотеза существования доменов в ферромагнетиках получила подтверждение в экспериментах Г. Баркгаузена в 1919 году. С помощью изобретенного к тому времени электронного усилителя сигналов он обнаружил, что намагниченность при намагничивании ферромагнетика изменяется скачками (в усилителе слышались щелчки). Эти щелчки (или скачки) отвечают перемагничиванию отдельного домена или некоторой группы доменов и называются скачками Баркгаузена.

Впервые непосредственно в микроскоп наблюдали магнитные домены в 1932 году Ф. Биттер, Л.В. Хамос и П.А. Тиссен. В этих экспериментах исследователи наносили на ферромагнитный кристалл суспензию, содержащую мелкие ферромагнитные взвешенные частицы. Последние концентрировались в основном вблизи доменных границ, где распределение намагниченности неоднородно и имеется магнитное поле. В результате была получена великолепная картина магнитных доменов. Указанный метод впоследствии получил название метода порошковых фигур или фигур Биттера.

В настоящее время для наблюдения доменных структур используются магнитооптический метод, метод электронной микроскопии, рентгенографический и нейтронографический методы. С их помощью удается получать хорошие картины магнитных доменов как на поверхности образца, так и в объеме. Домены в ферромагнетиках теперь можно непосредственно наблюдать и фотографировать. Таким образом, в настоящее время существование доменов в ферромагнетиках является установленным фактом.

Теория доменов и доменных стенок зародилась в 30-х годах нашего столетия. В 1930 году Я.И. Френкель и Я.Г. Дорфман показали, что магнитодипольное взаимодействие играет важную роль в формировании доменов. Согласно их гипотезе, в малых объемах образца магнитные моменты атомов параллельны друг другу из-за обменного взаимодействия, а в больших объемах основную роль играет магнитодипольное взаимодействие, которое приводит к размагничиванию больших образцов ферромагнетика. В 1932 году Ф. Блох впервые рассчитал переходной слой между доменами — структуру доменной границы. В его честь такую доменную границу называют блоховской.

Первая же детальная количественная теория, позволяющая доказать существование доменов и описать их размеры и форму, была построена в 1935 году в классической работе Л.Д. Ландау и Е.М. Лифшица. В ней содержались практически все представления, на которых базируется современная теория

доменов. Согласно этой теории, намагниченность в доменах практически однородна. Различные домены отделены один от другого переходным слоем — доменной границей. Толщина доменной границы значительно больше межатомного расстояния, то есть граница имеет макроскопические размеры.

## Причины появления доменов

Как уже отмечалось, основными взаимодействиями в ферромагнетике являются обменное и магнитодипольное. Важную роль также играет анизотропия ферромагнетиков. Обсудим современную точку зрения на роль указанных здесь факторов различной природы в формировании доменной структуры ферромагнетиков.

При отсутствии доменов, то есть в том случае, когда ферромагнетик намагничен однородно, минимальна сумма  $W_e + W_a$ . Конечно же, предполагается, что намагниченность направлена вдоль кристаллографической оси, отвечающей минимуму  $W_a$ . Но при этом должна быть максимальна энергия, связанная с возникновением вокруг образца магнитного поля  $W_m$ . Эта энергия для однородного намагниченного образца пропорциональна его объему  $V$ :

$$W_m \sim V.$$

При больших размерах образца  $W_m$  может принимать очень большие значения, а это говорит о том, что однородное намагничивание больших образцов является невыгодным.

Рассмотрим теперь другую крайнюю ситуацию, когда распределение намагниченности неоднородно по всему объему образца. В этом случае можно добиться того, чтобы была равна нулю энергия  $W_m$ . Расчет показывает, что в таком состоянии обменная энергия пропорциональна  $V^{1/3}$ . Казалось бы, здесь ситуация выгоднее, чем в предыдущем случае, где было .

Однако при неоднородной намагниченности во всем объеме образца в существенной его части намагниченность отклонена от направлений, где минимальна энергия анизотропии, поэтому в данном случае  $W_a$  пропорциональна объему образца. Таким образом, в общем случае и состояние с полностью неоднородной намагниченностью не является выгодным. Отметим, что такое состояние тем не менее бывает тогда, когда анизотропия ферромагнетика пренебрежимо мала, в частности у сердечников из магнитомягких материалов в трансформаторах.

Итак, видно, что условия минимальности энергий обмена, анизотропии и размагничивающих полей противоречивы. Как было показано в работе Ландау и Лифшица, на практике реализуется некоторая промежуточная между двумя рассмотренными выше ситуация с образованием доменной структуры. При этом в кристалле можно выделить однородно намагниченные домены, направление намагниченности в каждом из которых совпадает с одной из эквивалентных осей легкого намагничивания (это направления в ферромагнетике, в кото-

рых энергия анизотропии минимальна, их может быть несколько!). Домены разделены доменными границами. Размеры и форма доменов определяются конкуренцией рассмотренных выше взаимодействий в доменах и доменных границах.

Оказывается, что доменная структура ферромагнетика определяется в основном тремя факторами. Во-первых, она определяется геометрией образца, то есть его формой и ориентацией кристаллографических осей относительно поверхности. Во-вторых, энергией магнитной анизотропии, то есть наличием энергетически эквивалентных направлений намагниченности. В-третьих, в реальном образце доменная структура сильно зависит от наличия несовершенств или дефектов кристаллической структуры.

Сначала рассмотрим доменную структуру идеальной (без дефектов) одноосной плоскопараллельной пластинки с поверхностью, перпендикулярной оси анизотропии (ось  $Z$ ). Будем считать, что пластинка бесконечна вдоль осей  $X$  и  $Y$ , а ее толщина (размер вдоль оси  $Z$ ) равна  $h$ . При отсутствии внешнего магнитного поля намагниченность, согласно (2), при  $0$  может быть направлена либо вдоль оси  $Z$ , либо против нее. Очевидно, что при этом выгодно состояние, в котором будет существовать равное количество доменов с  $M_z = +M_0$  и  $M_z = -M_0$ , причем они должны чередоваться друг с другом (рис. 4.6.2). В таком состоянии полная энергия пластинки должна быть минимальна. Эта энергия

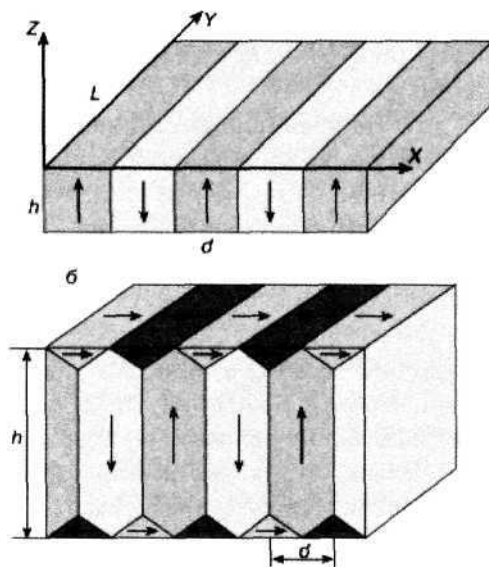


Рис. 4.6.2. Доменная структура ферромагнитной пластинки: *a* - структура без замыкания магнитного потока, *б* - структура с замыканием магнитного потока через призматические поверхностные замыкающие домены.

$L$  - размер пластинки вдоль осей  $Y$  и  $X$ ;  $h$  - высота пластинки вдоль оси  $Z$ ;  
 $d$  - толщина домена

складывается из энергии размагничивающего поля, которое в основном сосредоточено вблизи поверхности пластинки, и энергии доменных границ.

Как показали Л.Д. Ландау, Л.М. Лифшиц и Ч. Киттель, по порядку величины энергия размагничивающих полей пропорциональна

$$W_m = M_0^2 d S_0, \quad (3)$$

где  $M_0$  — намагниченность домена,  $d$  — толщина домена,  $S_0 = L_2$  — площадь пластины в плоскости  $XY$ . Ясно также, что энергия доменных границ

$$W_d = \sigma S_1 N, \quad (4)$$

где — энергия доменной границы на единицу поверхности,  $S_1 = Lh$  — площадь доменной границы,  $N = L/d$  — число доменов. Полная энергия пластины может быть записана в итоге в виде

$$W(d) = W_m + W_d = d S_0 M_0^2 + \frac{\sigma S_1 L}{d}, \quad (5)$$

или,

$$W(d) = \frac{d S_0 M_0^2}{h} + \frac{\sigma V}{d} = V \left( \frac{M_0^2 d}{h} + \frac{\sigma}{d} \right), \quad (6)$$

где  $V = L^2 h$  — объем пластины. Эта энергия минимальна при

$$d^2 = l_0 h, \quad (7)$$

где — характеристическая длина. Оценки показывают, что эта длина порядка  $10^{-6}$  см. С учетом (7) энергия пластинки запишется как

$$W = 2 V M_0^2 \sqrt{\frac{l_0}{h}}. \quad (8)$$

В однородно намагниченной пластинке  $W_0 = M_0^2 V$ . Отсюда следует, что отношение

$$\frac{W}{W_0} = 2 \sqrt{\frac{l_0}{h}} < 1, \quad (9)$$

тогда, когда  $l_0 < h$ . Итак, получается, что состояние с плоскопараллельной доменной структурой выгоднее энергетически по сравнению с состоянием с однородной намагниченностью при  $h > \text{см}$ . В этом случае равновесный размер домена, согласно (7), растет с увеличением толщины пластины как. Эта зави-

симось при не очень большой толщине пластин прекрасно согласуется с экспериментальными результатами. Однако в образцах с очень большой толщиной наблюдается отклонение от данной зависимости. В 1945 году ЕМ. Лифшиц теоретически показал, что при большой толщине пластин может начаться ветвление доменов у поверхности образца. В каждом домене могут образовываться клиновидные домены с противоположным направлением намагниченности по сравнению с направлением намагниченности в основном домене. Их размер и количество зависят от толщины образца. Такая структура приводит к смене зависимости ширины домена от толщины образца с на .

Из (9) следует, что при  $K \ll 0$ , то есть при малой толщине пластин, выгоднее становится состояние с однородной намагниченностью. Это утверждение носит название критерия однодоменности. Данный критерий был сформулирован Френкелем и Дорфманом в 1930 году.

Рассмотренная доменная структура относится к классу доменных структур с незамкнутыми силовыми линиями магнитного поля внутри образца (незамкнутым магнитным потоком). Оказывается, что такая структура не всегда является энергетически выгодной. Как показали Ландау и Лифшиц, в случае одноосного ферромагнетика зачастую более выгодными являются доменные структуры с замкнутым магнитным потоком (рис. 2, б). Эта модель отличается от рассмотренной выше наличием треугольных замыкающих призматических областей. В результате магнитный поток оказывается замкнутым внутри кристалла. Магнитные полюсы на поверхности при этом исчезают, и вместе с этим обращается в нуль вклад магнитодипольной энергии. Но в то же время увеличивается энергия анизотропии, так как в замыкающих доменах намагниченность перпендикулярна направлению, в котором минимальна энергия анизотропии. Расчет показывает, что такая доменная структура будет выгодней по сравнению с предыдущей в том случае, если так называемый фактор качества образца  $Q = \beta M^2 / (4\pi M^2) = \beta / (4\pi)$  будет меньше единицы. В противном случае будет реализовываться доменная структура с незамкнутым магнитным потоком.

в кубических ферромагнетиках всегда наблюдаются доменные структуры с призматическими замыкающими доменами. В этом случае и энергия анизотропии (в кубических кристаллах перпендикулярное к выгодному направлению намагниченности также энергетически выгодно), и энергия магнитодипольного взаимодействия практически равны нулю и размеры доменов определяются величиной внутренних механических напряжений, возникающих в ферромагнетике при формировании доменной структуры.

### **Цилиндрические магнитные домены**

Проведенный анализ базировался на предположении о плоскопараллельной форме доменов. Такие структуры наблюдаются в тонких пленках и пластинках. Однако в реальных ферромагнитных образцах нередки и другие виды доменных структур. В одноосных кристаллах часто наблюдаются так называемые лабиринтные доменные структуры. Их возникновение объясняется тем, что направление доменных границ в плоскости пластины ничем не фиксиру-

вано (в плоскости пластины нет анизотропии). Изгиб доменных границ может быть обусловлен малыми неоднородностями пленки, случайностью в момент зарождения доменной структуры или эффектами тепловой хаотизации. Такая структура остается выгодной и при помещении в малое внешнее магнитное поле, перпендикулярное поверхности пленки.

При увеличении магнитного поля в такой ситуации возникает очень интересное явление. Очевидно, что при увеличении поля растут домены, в которых вектор параллелен вектору индукции магнитного поля  $\mathbf{B}$  и, наоборот, уменьшается размер доменов, в которых  $\mathbf{M}$  антипараллелен  $\mathbf{B}$ . Размер последних доменов при некотором значении  $B$  может стать порядка характерного размера  $l_0$ , введенного выше. При этом данный полосовой домен распадается на отдельные цилиндрические домены кругового сечения (рис. 4.6.3). Благодаря магнитодипольному взаимодействию они отходят друг от друга и равномерно распределяются по всей поверхности пластины, образуя, как правило, правильную гексагональную решетку. Плотность доменов зависит от величины индукции  $B$ . Интересно отметить, что при уменьшении  $B$  решетка цилиндрических магнитных доменов (ЦМД) может сохраняться и в слабых полях, даже при  $B = 0$ .

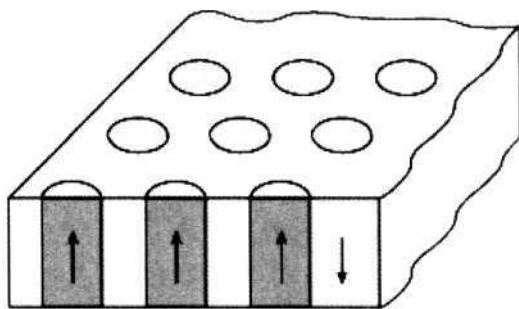


Рис. 4.6.3. Цилиндрические магнитные домены

ЦМД обладают интересными, присущими только им свойствами. Если в пластинке с полосовой доменной структурой внутреннее магнитное поле должно быть равно нулю, то в образцах с ЦМД из-за наличия кривизны доменных границ это поле должно быть отлично от нуля. Иначе ЦМД не будут устойчивыми. Ситуация здесь аналогична поведению пузырька газа в жидкости. Для существования пузырька в жидкости необходимо, чтобы давление внутри пузырька отличалось от давления в жидкости. Также и в случае ЦМД: для их устойчивого существования необходимо наличие внутреннего магнитного поля, которое будет создавать дополнительное давление на искривленную доменную границу. Приведенная аналогия как раз объясняет английское название ЦМД - magnetic bubble (магнитный пузырек).

Очень интересно ведет себя ЦМД во внешнем магнитном поле (рис. 4.6.4). Предположим, что сначала в пластинке при  $B = 0$  существует полосовой или лабиринтный домен или доменная структура. При увеличении магнитного поля до некоторого значения  $B_1$ , которое называется полем эллиптической неустойчивости ЦМД, лабиринтная структура только несколько деформируется. При  $B > B_1$  происходит зарождение устойчивых ЦМД. Если же  $B < B_1$ , то круговая форма ЦМД становится неустойчивой относительно растяжения в некотором направлении. Отсюда и происходит переход в лабиринтную структуру. В интервале полей  $B_1 < B < B_2$  энергия ЦМД меньше энергии лабиринтной доменной структуры и однородного состояния, то есть в этом интервале существуют стабильные ЦМД. При  $B = B_2$  энергии ЦМД и однородного состояния сравниваются, однако тем не менее в пластине могут существовать метастабильные ЦМД, так как на кривой зависимости энергии ЦМД от его радиуса имеется локальный минимум при некотором значении диаметра ЦМД  $d_0$ . Данное значение  $d_0$  конечно же, зависит от величины магнитного поля. При увеличении  $B$   $B_2$  величина  $d_0$  уменьшается. После достижения  $d_0$  значения, называемого критическим ( $d_{cr}$ ), ЦМД скачком исчезает — коллапсирует. Значение магнитного поля, при котором происходит коллапс ЦМД, называется

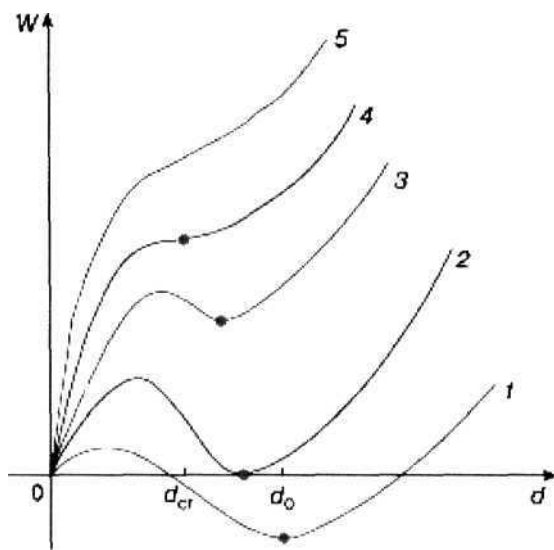


Рис. 4.6.4. Зависимость энергии  $W$  ЦМД от его диаметра при различных значениях индукции магнитного поля  $B$ : (1)  $B_1 < B < B_2$ , (2)  $B = B_2$ , (3)  $B_2 < B < B_{kol}$ , (4)  $B = B_{kol}$ , (5)  $B > B_{kol}$ ;  $d_0$  — равновесный диаметр ЦМД, отвечающий минимуму энергии,  $d_{cr}$  — критическое значение диаметра ЦМД



полем коллапса ( $B_{kol}$ ). При  $B > B_{kol}$  выгодно однородное намагничивание пластины, то есть ЦМД в этих полях отсутствуют.

Рассмотрим более подробно изолированный ЦМД. Форма ЦМД сохраняется благодаря равновесию двух факторов: тенденции к уменьшению радиуса домена, ведущей к понижению энергии доменной стенки из-за уменьшения площади поверхности стенки, и тенденции к увеличению радиуса, ведущей к понижению энергии магнитодипольного взаимодействия. Увеличение радиуса ЦМД вызывает понижение магнитодипольной энергии из-за того, что размагничивающее поле внутри ЦМД ориентировано в направлении вектора намагниченности вне домена. Образующиеся на поверхности торцов ЦМД магнитные полюсы противоположны по знаку полюсам на поверхности области, граничащей с ЦМД. В результате уменьшаются суммарное размагничивающее магнитное поле и энергия магнитодипольного взаимодействия. Расчет показывает, что суммарное размагничивающее поле направлено против намагниченности вне домена и пропорционально  $(1 - 2N)M$ , где  $N = N(r)$  — так называемый размагничивающий фактор ЦМД, зависящий от его радиуса  $r$ . Кроме того, если поверхностная энергия доменной стенки равна  $\sigma$ , то магнитное поле, обусловленное давлением внутри ЦМД радиусом  $r$ , будет пропорционально (по аналогии с давлением внутри пузырька в жидкости, известным из школьного курса физики)  $-\sigma/2Mr$ . Знак минус означает, что этот эффект приводит к сжатию домена. Для того чтобы ЦМД находился в состоянии статического равновесия, необходимо, чтобы сумма указанных полей уравнивалась внешним магнитным полем. Анализ полученного условия равновесия показывает, что существует такое значение радиуса ЦМД, которое как раз и соответствует устойчивому состоянию с ЦМД. В малых полях ЦМД становится неустойчивым относительно перехода в полосовой домен, а в больших полях радиус домена уменьшается и ЦМД исчезает (коллапсирует) — происходит переход к однородному состоянию без доменов.

### **Применение цмд для записи информации**

ЦМД в настоящее время применяются в устройствах памяти ЭВМ. Логическим элементом 1 в этих устройствах является сам ЦМД и элементом 0 — пространство между ЦМД.

Впервые ЦМД обнаружили группы чехословацких и голландских физиков в 1961 году. После открытия в 1965 году высокой подвижности ЦМД в ряде магнитных пленок (до 10-15 км/с) американский физик Э. Бобек выдвинул идею отнести ЦМД к числу перспективных кандидатов на роль носителей информации в запоминающих устройствах нового типа — без механических частей.

Почему выгодно использовать ЦМД в качестве носителей информации ЭВМ? Для этого надо вспомнить основные желаемые требования к носителям информации. Во-первых, необходимо, чтобы плотность записи информации была высока. Это позволяет сделать носители информации и сами ЭВМ как можно меньшими. Во-вторых, желательно, чтобы скорость записи и считыва-

ния информации была высокой. Это налагает очень жесткие требования к механической части запоминающих устройств.

Элементы памяти на основе ЦМД как раз позволяют решить указанные проблемы. Повышение плотности записи информации на основе ЦМД может быть достигнуто за счет уменьшения диаметра ЦМД. В настоящий момент диаметр ЦМД доведен до значений  $\sim 1$  мкм, что позволяет создать устройства с плотностью записи  $0,1$  Гбит/см<sup>2</sup>. Повышение скорости записи и считывания достигается, как указывалось выше, большой подвижностью ЦМД. А самое главное — в устройствах с ЦМД нет механических частей. Запись и считывание информации в них осуществляются за счет движения ЦМД по магнитной пленке. Для создания и перемещения ЦМД используются технологические схемы, например метод магнитных аппликаций и переменного вращающегося магнитного поля, проводников с током, локального разогрева пленки лазерным лучом и т.д. В основном распространены первые два метода.

### **Перспективы развития магнитной памяти**

Несколько слов о тех возможностях памяти на магнитных доменах, которые, возможно, будут реализованы в недалеком будущем. Это перспектива повышения параметров памяти на ЦМД за счет уменьшения размеров доменов. Повышение плотности записи может быть достигнуто уменьшением диаметра ЦМД до  $1$  мкм или даже долей микрометра. Однако здесь возникает чисто технологическая проблема записи и считывания информации. Должна быть решена задача о создании устройств, которые были бы способны работать с такими малыми доменами.

Использование ЦМД-устройств при создании памяти имеет большие преимущества. В них, как и в магнитофоне, легко записывать и стирать информацию. Однако нередко возникает потребность в стационарной памяти (типа пластинки). Для таких систем весьма перспективен терромагнитный способ записи информации с использованием лазерного луча. Для хорошо сфокусированного лазерного луча удастся получить объем записи информации  $\sim 0,1$  Гбит/см<sup>2</sup>.

Одним из перспективных способов записи информации считают запись на основе особого класса магнитных неоднородностей — блоховских линий. Эти неоднородности возникают в доменных границах. Как указывалось выше, в доменных границах происходит поворот намагниченности от одного вида легкого направления в домене к другому в соседнем домене. Оказывается, что этот разворот может происходить как по часовой стрелке, так и против нее. Если в доменной границе имеются оба разворота, то промежуточная область в доменной границе, которая отделяет два данных противоположных вращения намагниченности, и называется блоховской линией.

Блоховские линии имеют меньшие размеры, чем ЦМД, так как они находятся в доменных границах самих ЦМД. Поэтому использование блоховских линий в качестве носителей информации позволит резко повысить плотность записи информации. Однако для реализации такой теоретической возможности нужно решить много технологических задач.

В последнее время также обсуждается возможность создания устройств с объемной записью информации, в которых носителями информации были бы точки пересечения двух различных блоховских линий — блоховские точки.

Отметим, что в последнее время за счет новых открытий в магнетизме (например, эффекта гигантского магнитосопротивления в наноструктурах и мультислоях) можно спрогнозировать к 2000 году появление устройств памяти с плотностью записи практически до 100 Гбит/см<sup>2</sup>.

Таким образом, использование магнитных доменов и магнитных свойств веществ позволяет создать запоминающие устройства с новыми возможностями и свойствами. Перечислим их еще раз. Это высокая надежность, обусловленная отсутствием механических частей. Эти устройства не боятся воздействия радиации. Наконец, их информативная емкость уже достаточно велика, но еще может быть повышена в сотни и тысячи раз. Общими достоинствами запоминающих устройств на магнитных материалах являются их энергонезависимость, так как хранение информации не связано с затратами энергии, а также их малые размеры, что позволяет миниатюризировать элементы памяти.

## Литература

1. Каганов М.И., Цукерник В.М. Природа магнетизма. М.: Наука, 1982. 192 с. (Б-ка "Квант"; Вып. 16).

2. Барьяхтар В.Г., Иванов Б.А. В мире магнитных доменов. Киев: Наук. думка, 1986. 159 с.

Источник: [www.phys.web.ru](http://www.phys.web.ru)

## 4.7. Магнетохимия

Магнетохимия — раздел химии, изучающий магнитные свойства веществ, а также их связь со строением молекул. Становление ее как науки можно отнести к началу XX века, когда были открыты основные законы магнетизма. Цель статьи — дать общие представления о магнетохимии.

Магнетизм — фундаментальное свойство материи. С глубокой древности известно свойство постоянных магнитов притягивать железные предметы. Много веков среди мореплавателей существовала легенда о магнитной скале, которая якобы способна притянуть из слишком близко подплывшего к ней корабля железные гвозди и разрушить его. К счастью, такое сильное магнитное поле может существовать только в окрестностях нейтронных звезд. Развитие электромагнетизма позволило создать электромагниты более сильные, чем существующие в природе постоянные. Вообще различные приборы и устройства, основанные на использовании электромагнитных явлений, распространены настолько широко, что сейчас без них нельзя уже представить жизни.

Однако с магнитным полем взаимодействуют не только постоянные магниты, но и все остальные вещества. Магнитное поле, взаимодействуя с веществом, изменяет свою величину по сравнению с вакуумом (здесь и далее все формулы записаны в системе СИ):

$$B = \mu \mu_0 H,$$

где  $\mu_0$  -- магнитная постоянная, равная  $4\pi \cdot 10^{-7}$  Гн/м,  $\mu$  -- магнитная проницаемость вещества,  $B$  -- магнитная индукция (в Тл),  $H$  -- напряженность магнитного поля (в А/м). Для большинства веществ  $\mu$ , очень близка к единице, поэтому в магнетохимии, где основным объектом является молекула, удобнее использовать величину  $\chi$ , определяемую уравнением

$$\chi = \frac{\mu - 1}{4\pi},$$

которая называется магнитной восприимчивостью.  $\chi$  можно отнести к единице объема, массы или количества вещества, тогда она называется соответственно объемной (безразмерной)  $\chi_v$ , удельной  $\chi_d$  (в см<sup>3</sup>/г) или молярной  $\chi_m$  (в см<sup>3</sup>/моль) магнитной восприимчивостью. Понятно, что, следуя формуле (2),  $\chi$  вакуума равна нулю. Вещества можно разделить на две категории: те, которые ослабляют магнитное поле ( $\chi < 0$ ), называются диамагнетиками, те, которые усиливают ( $\chi > 0$ ), -- парамагнетиками (рис. 4.7.1).

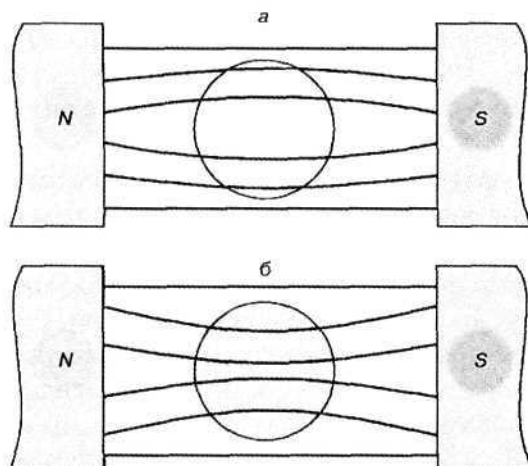


Рис. 4.7.1. Поведение различных веществ в магнитном поле: а -- диамагнетики, б -- парамагнетики

Можно представить себе, что в неоднородном магнитном поле на диамагнетик действует сила, выталкивающая его из поля, на парамагнетик, наоборот, - втягивающая. На этом основаны рассмотренные ниже методы измерения магнитных свойств веществ. Диамагнетики (а это подавляющее большинство органических и высокомолекулярных соединений) и главным образом парамагнетики являются объектами изучения магнетохимии.

Диамагнетизм -- важнейшее свойство материи, обусловленное тем, что под действием магнитного поля электроны в заполненных электронных оболочках (которые можно представить как маленькие проводники) начинают прецессировать, а, как известно, любое движение электрического заряда вызывает магнитное поле, которое по правилу Ленца будет направлено так, чтобы уменьшить воздействие со стороны внешнего поля. Электронную прецессию при этом можно рассматривать как круговые токи. Диамагнетизм свойствен всем веществам, кроме атомарного водорода, потому что у всех веществ имеются спаренные электроны и заполненные электронные оболочки.

Парамагнетизм обусловлен неспаренными электронами, которые называются так потому, что их собственный магнитный момент (спин) ничем не уравновешен (соответственно спины спаренных электронов направлены в противоположные стороны и компенсируют друг друга). В магнитном поле спины стремятся выстроиться по направлению поля, усиливая его, хотя этот порядок и нарушается хаотическим тепловым движением. Поэтому понятно, что парамагнитная восприимчивость зависит от температуры — чем ниже температура, тем выше значение  $\chi_m$ . В простейшем случае это выражается зависимостью, которая называется законом Кюри:

$$\chi = \frac{C}{T},$$

где  $C$  — константа Кюри, или законом Кюри-Вейсса

$$\chi = \frac{C}{T - \theta},$$

где  $\theta$  — поправка Вейсса. Этот вид магнитной восприимчивости еще называют ориентационным парамагнетизмом, так как его причина — ориентация элементарных магнитных моментов во внешнем магнитном поле.

Магнитные свойства электронов в атоме можно описывать двумя способами. В первом способе считается, что собственный (спиновый) магнитный момент электрона не оказывает влияния на орбитальный (обусловленный движением электронов вокруг ядра) момент или наоборот. Точнее, такое взаимное влияние есть всегда (спин-орбитальное взаимодействие), но для 3d-ионов оно мало, и магнитные свойства можно с достаточной точностью описывать двумя квантовыми числами  $L$  (орбитальное) и  $S$  (спиновое). Для более тяжелых атомов такое приближение становится неприемлемым и вводится еще одно квантовое число полного магнитного момента  $J$ , которое может принимать значе-

ния от  $|L + S|$  до  $|L - S|$  [ 1,2]. Ван-Флек рассмотрел энергетические вклады орбиталей в зависимости от влияния магнитного поля (согласно квантовой механической теории возмущений их можно разложить в ряд и суммировать):

$$E_n = E_n^{(0)} + HE_n^{(1)} + H^2 E_n^{(2)},$$

где  $H$  - напряженность магнитного поля и соответственно  $E^{(0)}$  — вклад, независимый от внешнего поля,  $E^{(1)}$  — вклад, прямо пропорциональный полю, и т.д. При этом оказалось, что энергия нулевого порядка определяется спин-орбитальным взаимодействием, важным в описании химических связей:

$$E^{(1)} = \lambda LS,$$

где  $\lambda$  — константа спин-орбитального взаимодействия. Энергия первого порядка (взаимодействия магнитного момента неспаренного электрона с магнитным полем  $H$ ) равна

$$E^{(1)} = g\beta LS,$$

где  $g$  — фактор Ланде, обычно равный двум для большинства соединений,  $\beta$  — магнетон Бора, равный  $9,27 \cdot 10^{-19}$  эрг/Э (напомним, что энергия магнитных взаимодействий — это скалярное произведение векторов магнитных моментов  $\mu$  и  $H$ ).  $E^{(2)}$  — энергетический вклад, который придется принять на веру, так как он зависит от тонких особенностей электронного строения и его сложно объяснить с точки зрения классической физики. Следует обратить внимание на малость величины энергии магнитного взаимодействия (для комнатных температур и магнитных полей, обычных в лаборатории, энергия магнитных взаимодействий на три-четыре порядка меньше, чем энергия теплового движения молекул).

После математических преобразований выражение для макроскопической магнитной восприимчивости с учетом больцмановского распределения ансамбля магнитных моментов по энергетическим уровням принимает вид (его вывод изложен, например, в [1]):

$$\chi_M = N_A \frac{\sum_n \left[ \frac{(E_n^{(1)})^2}{kT} - 2E_n^{(2)} \right] \exp\left(\frac{E_n^{(0)}}{kT}\right)}{\sum_n \exp\left(\frac{E_n^{(0)}}{kT}\right)}.$$

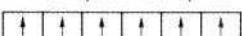
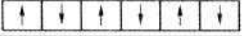
Это и есть уравнение Ван-Флека — основное в магнетохимии, связывающее магнитные свойства со строением молекул. Здесь  $N_A$  — число Авогадро,

$k$  — постоянная Больцмана. С некоторыми крайними случаями его мы уже встречались выше. Если  $E^{(0)} = 0$  а  $E^{(1)}$  можно пренебречь, то мы получаем в результате закон Кюри (ср. уравнение (3)), но в более строгой форме:

$$\chi = \frac{N_A g^2 \beta^2}{4kT}.$$

Таблица 1.

### Основные классы магнитных веществ

| Свойство           | Знак $\chi$ | Величина $\chi$     | Зависимость $\chi$ от магнитного поля | Значение $\chi$ , типичных представителей при 25°C                     | Чем вызван магнетизм                                                                                                                                                    |
|--------------------|-------------|---------------------|---------------------------------------|------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Диамагнетизм       | —           | $10^{-6} - 10^{-5}$ | Нет                                   | $-0,72 \cdot 10^{-6}$ (вода)<br>$-14 \cdot 10^{-6}$ (висмут)           | Прецессия спаренных электронов<br>                                                     |
| Парамагнетизм      | +           | $10^{-5} - 10^{-3}$ | Нет                                   | $0,15 \cdot 10^{-6}$ (кислород)<br>$14 \cdot 10^{-6}$ (вольфрам)       | Собственный магнитный момент неспаренного электрона<br>                                |
| Ферромагнетизм     | +           | $10^2 - 10^4$       | Есть                                  | До 650 (железо)<br>До 8000 ( $\text{Sm}_{1-x}\text{Pr}_x\text{Co}_3$ ) | Кооперативное выстраивание спинов неспаренных электронов<br>                          |
| Антиферромагнетизм | +           | $10^{-4} - 10^{-2}$ | Есть                                  | До $10^{-2}$ (MnO)                                                     | Антипараллельное выстраивание спинов неспаренных электронов двух подсистем<br>        |
| Ферримагнетизм     | +           | $10^3 - 10^5$       | Есть                                  | До 60 ( $\text{BaFeO}_3$ )                                             | Антипараллельное выстраивание спинов неспаренных электронов двух разных подсистем<br> |

Видно, что закон Кюри отражает так называемый чисто спиновый магнетизм, характерный для большинства парамагнитных соединений, например солей меди, железа, никеля и других переходных металлов. Если  $E^{(1)} = 0$  и  $E^{(0)} > kT$ , то уравнение Ван-Флека значительно упрощается:

$$\chi_M = N_A (-2E_n^{(2)}) = N\alpha > 0$$

где  $N\alpha$  — температурно независимый (ван-флековский) парамагнетизм. Как видно из изложенного, ван-флековский парамагнетизм — явление чисто квантовое и необъяснимо с позиций классической физики. Его можно представить как примешивание к основному состоянию молекулы возбужденных энергетических уровней [3].

Существует довольно много веществ, которые при понижении температуры ведут себя сначала как парамагнетики, а затем при достижении определенной температуры резко меняют свои магнитные свойства. Самый известный пример — ферромагнетики и вещество, по которому они получили свое название, -- железо, атомные магнитные моменты которого ниже температуры

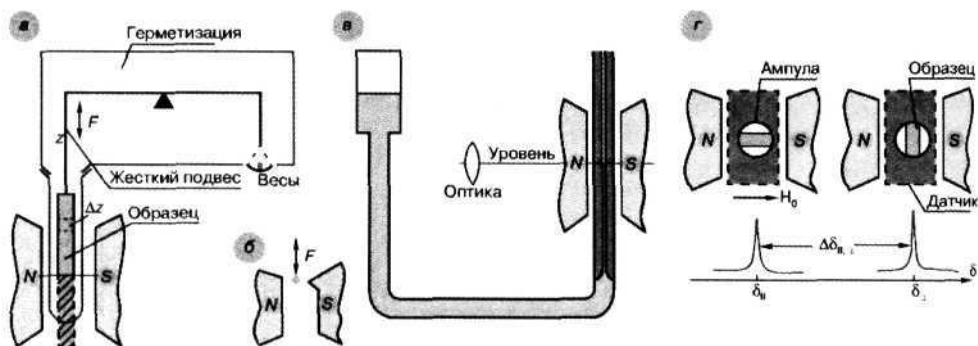


Рис. 4.7.2. Некоторые методы измерения магнитной восприимчивости:  
а — Гуи, б- Фарадея, в — Квинке, г- ЯМР в плоских ампулах

Кюри (в этом случае равной  $T_c = 770^\circ\text{C}$ ) выстраиваются в одном направлении, вызывая спонтанную намагниченность. Однако макроскопической намагниченности при отсутствии поля не возникает, так как образец самопроизвольно разделяется на области размером около 1 мкм, называемые доменами, в пределах которых элементарные магнитные моменты направлены одинаково, но намагниченности разных доменов ориентированы случайно и в среднем компенсируют друг друга. Силы, вызывающие ферромагнитный переход, можно объяснить только при помощи законов квантовой механики.

Антиферромагнетики характеризуются тем, что спиновые магнитные моменты при температуре антиферромагнитного перехода (температура Нееля  $T_N$ ) упорядочиваются так, что взаимно компенсируют друг друга. Максимальное значение магнитной восприимчивости достигается при  $T_N$ , выше которой  $\chi$  уменьшается по закону Кюри-Вейсса, ниже — вследствие так называемых обменных взаимодействий. Антиферромагнетиками являются, например,  $MnO$  и  $KNiF_3$ .

Если компенсация магнитных моментов неполная, то такие вещества называются ферримагнетиками, например  $Fe_2O_3$  и  $FeCr_2O_4$ . Последние три класса соединений (табл. 1) являются твердыми телами и изучаются в основном физиками. За последние десятилетия физики и химики создали новые магнитные материалы, более подробно о свойствах которых можно узнать в [2,3].

В молекуле, содержащей неспаренный электрон, остальные (спаренные) электроны ослабляют магнитное поле, но вклад каждого из них на два-три порядка меньше. Однако если мы хотим очень точно измерить магнитные свойства неспаренных электронов, то должны вводить так называемые диамагнитные поправки, особенно для больших органических молекул, где они могут



достигать десятков процентов. Диамагнитные восприимчивости атомов в молекуле складываются друг с другом согласно правилу аддитивности Паскаля-Ланжевена [4]. Для этого диамагнитные восприимчивости атомов каждого сорта умножают на количество таких атомов в молекуле, а затем вводят конститутивные поправки на особенности строения (двойные и тройные связи, ароматические кольца и т.п.). Перейдем к рассмотрению того, как же экспериментально изучают магнитные свойства веществ.

## Экспериментальное измерение магнитной восприимчивости

Основные экспериментальные методы определения магнитной восприимчивости были созданы еще в прошлом веке. Согласно методу Гуи (рис. 4.7.2, а), измеряется изменение веса образца в магнитном поле по сравнению с его отсутствием, которое равно

$$\Delta mg = \frac{1}{2}(\chi - \chi_0)S(H_{\max}^2 - H_{\min}^2),$$

где  $\Delta mg = F$  - сила, действующая на вещество в градиенте магнитного поля,  $\chi$  — измеряемая магнитная восприимчивость вещества,  $\chi_0$  — магнитная восприимчивость среды (воздуха),  $S$  — площадь поперечного сечения образца,  $H_{\max}$  и  $H_{\min}$  — максимальная и минимальная напряженность внешнего магнитного поля.

По методу Фарадея (рис.4.7.2, б) измеряется сила, действующая на образец в неоднородном магнитном поле:

$$F = \chi m H_0 \frac{dH}{dz}.$$

Образец выбирается малым, чтобы  $H_0 dH/dz$  в его пределах оставалось постоянной, а максимальное значение параметра достигается выбором специального профиля наконечников магнита. Основное отличие метода Гуи от метода Фарадея заключается в том, что в первом случае поддерживается неоднородность по (протяженному) образцу, а во втором - по магнитному полю.

Метод Квинке (рис. 4.7.2, в) применяется только для жидкостей и растворов. В нем измеряется изменение

$$\Delta h = \frac{H_0^2(\chi - \chi_0)}{2g}$$

высоты столбика жидкости в капилляре под действием магнитного поля.

При этом для диамагнитных жидкостей высота столбика понижается, для парамагнитных повышается.

По методу вискозиметра измеряется время истечения жидкости через малое отверстие при включенном ( $t_H$ ) и выключенном ( $t_0$ ) магнитном поле. Время истечения парамагнитных жидкостей в магнитном поле заметно меньше, чем при отсутствии поля, для диамагнитных — наоборот. Разность двух времен истечения определяется магнитной восприимчивостью

$$\frac{t_0 - t_H}{t_H} = k\chi,$$

а значение калибровочной константы  $k$  определяется при помощи измерения жидкости с известной магнитной восприимчивостью. Объемные магнитные восприимчивости некоторых распространенных растворителей приведены ниже.

| Растворитель    | $\chi_v \cdot 10^6$ |
|-----------------|---------------------|
| Вода            | 0,7179              |
| Тетрагидрофуран | 0,6389              |
| Толуол          | 0,6137              |
| Бензол          | 0,6070              |
| Изопропанол     | 0,6031              |
| н-Октан         | 0,5966              |
| Нитробензол     | 0,5950              |
| Этанол          | 0,5777              |
| Диметилформамид | 0,5682              |
| Метанол         | 0,5227              |
| Ацетонитрил     | 0,5220              |
| Ацетон          | 0,4600              |

Магнитную восприимчивость можно измерить и при помощи ЯМР-спектрометра. О физических основах метода ЯМР можно прочитать в [1, 5]. Мы ограничимся лишь тем, что отметим: величина химического сдвига сигнала ЯМР в общем случае определяется не только константой экранирования, которая является мерой электронной плотности на исследуемом ядре, но и магнитной восприимчивостью образца. Для образца в форме прямоугольного параллелепипеда химический сдвиг определяется еще и ориентацией образца в магнитном поле

$$\delta_{\perp} - \delta_{\parallel} = A\chi + B$$

где калибровочные константы  $A$  и  $B$  определяются измерением двух жидкостей с известной магнитной восприимчивостью (чаще всего воды и ацетона). Этот метод был развит на кафедре неорганической химии Казанского университета и является единственным, который позволяет производить калибровку прибора по диамагнитным стандартам, а затем проводить измерения также и с парамагнитными образцами [4]. Таким образом были измерены магнитные

восприимчивости многих веществ. Что же они позволили узнать об их строении?

## Как сосчитать электроны при помощи магнитных измерений

Полученное значение магнитной восприимчивости для парамагнетиков определяется количеством неспаренных электронов (ср. с (9) для одного неспаренного электрона)

$$\chi_M = \frac{N_A g^2 \beta^2}{2kT} S(S+1).$$

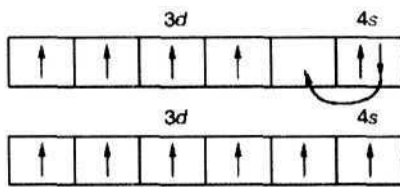
Таким образом можно определить спиновое квантовое число  $S$ , а следовательно, и число неспаренных электронов. Следует отметить, что в реальных соединениях  $g$ -фактор несколько изменяется от величины "чисто спинового" значения, равного, как отмечалось выше, двум.

Значения  $\chi_M$  парамагнитных веществ малы и не очень удобны при объяснении строения соединений. Поэтому чаще парамагнитную восприимчивость характеризуют эффективным магнитным моментом  $\mu_{eff}$ , который определяется уравнением

$$\mu_{eff} = \sqrt{\frac{3kT}{N_A \beta^2} \chi_M}.$$

Тогда при температуре 298K "чисто спиновое" значение для одного неспаренного электрона  $\chi_M$  — 1,73 магнетона Бора (МБ), для двух — 3,46 МБ и т.д. (табл. 2). Вклад других факторов, в первую очередь спин-орбитального взаимодействия, отражается на величине  $g$ -фактора и приводит к тому, что  $\mu_{eff}$  отличается от  $\chi_M$ .

Знание количества неспаренных электронов помогает понять некоторые особенности размещения элементов в Периодической системе Д.И. Менделеева. Так, электронные оболочки, заполненные полностью либо точно наполовину, обладают повышенной устойчивостью. С возрастанием относительной атомной массы мы впервые сталкиваемся с этим у хрома. Сравним электронные конфигурации в основном состоянии: Sc  $3d^1 4s^2$ , Ti  $3d^2 4s^2$ , V  $3d^3 4s^2$ , следующий хром не  $3d^4 4s^2$ , а  $3d^5 4s^1$ , более устойчивая полузаполненная оболочка подчеркнута:



**Теоретические и экспериментальные значения магнитной восприимчивости (в ХБ) парамагнитных  $3d$ - и  $4f$  акваионов [1,4]**

| Акваион   | Электронная конфигурация | Спин S | ms   | meff |
|-----------|--------------------------|--------|------|------|
| $Ti^{3+}$ | $3d^1$                   | 1/2    | 1,73 | 1,72 |
| $VO^{2+}$ | $3d^1$                   | 1/2    | 1,73 | 1,78 |
| $V^{3+}$  | $3d^2$                   | 1      | 2,83 | 2,89 |
| $Cr^{3+}$ | $3d^3$                   | 3/2    | 3,87 | 3,92 |
| $Mn^{2+}$ | $3d^3$                   | 5/2    | 5,92 | 5,90 |
| $Fe^{3+}$ |                          |        |      | 5,89 |
| $Fe^{3+}$ | $3d^6$                   | 2      | 4,90 | 5,13 |
| $Co^{2+}$ | $3d^7$                   | 3/2    | 3,87 | 4,97 |
| $Ni^{2+}$ | $3d^8$                   | 1      | 2,83 | 3,11 |
| $Cu^{2+}$ | $3d^9$                   | 1/2    | 1,73 | 1,83 |
| $Ce^{3+}$ | $4f^1$                   | 1/2    | 1,73 | 2,5  |
| $Pr^{3+}$ | $4f^2$                   | 1      | 2,83 | 3,5  |
| $Nd^{3+}$ | $4f^3$                   | 3/2    | 3,87 | 3,6  |
| $Pm^{3+}$ | $4f^4$                   | 2      | 4,90 | ~2,8 |
| $Sm^{3+}$ | $4f^5$                   | 5/2    | 5,92 | 1,5  |
| $Eu^{3+}$ | $4f^6$                   | 3      | 6,92 | 3,4  |
| $Gd^{3+}$ | $4f^7$                   | 7/2    | 7,94 | 7,9  |
| $Tb^{3+}$ | $4f^8$                   | 3      | 6,92 | 9,7  |
| $Dy^{3+}$ | $4f^9$                   | 5/2    | 5,92 | 10,5 |
| $Ho^{3+}$ | $4f^{10}$                | 2      | 4,90 | 10,5 |
| $Er^{3+}$ | $4f^{11}$                | 3/2    | 3,87 | 9,5  |
| $Tm^{3+}$ | $4f^{12}$                | 1      | 2,83 | 7,4  |
| $Yb^{3+}$ | $4f^{13}$                | 1/2    | 1,73 | 4,5  |

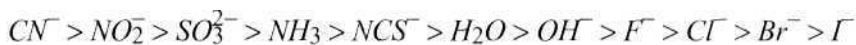
А установлено это именно по измерениям магнитной восприимчивости, когда было обнаружено, что атом хрома содержит шесть неспаренных электронов, а не четыре. Правда, для этого пришлось выполнить довольно тонкие измерения на изолированных атомах в газовой фазе, так как магнитные свойства проводников не связаны с числом неспаренных электронов (потому что валентные электроны в металлах не привязаны к определенным атомам, а хаотически движутся по всему кристаллу), а определяются квантовыми законами (так называемые диамагнетизм Ферми и парамагнетизм Ландау [2, 3]). В то же время, например, порядок заполнения  $5d$  и  $4f$ -орбиталей в ряду лантанидов не изменяет числа неспаренных электронов, поэтому правильные электронные конфигурации были установлены только в 60-е годы путем квантово-механических расчетов (по магнитным измерениям нельзя различить конфи-

гурации  $5d'$  и  $4f'$ ). Тем не менее магнетохимические исследования позволяют установить электронную конфигурацию, как, наверное, уже заметил внимательный читатель, соединений переходных металлов, которые составляют основу химии координационных (комплексных) соединений.

Координационные соединения образуются, как правило, за счет донорно-акцепторной связи, то есть неподеленные пары электронов лигандов занимают вакантные места на орбиталях центрального атома. При этом количество неспаренных электронов и магнитный момент ионов-комплексобразователей остается таким же, как и у свободного иона в газовой фазе. Это справедливо для аквакомплексов переходных металлов, например железа(II) (рис. 4.7.3). Однако существуют также магнитно-аномальные комплексы, магнитный момент которых ниже, чем у газообразного иона. Их электронную структуру можно объяснить в рамках метода валентных связей следующим образом. Очень многие комплексные соединения имеют координационное число шесть. Шесть лигандов симметрично расположены в вершинах октаэдра. Для того чтобы получить шесть гибридных орбиталей, в их образовании должны принять участие шесть валентных орбиталей центрального атома: такое перераспределение электронной плотности называется  $sp^3d^2$ -гибридизацией (ср. с  $sp^3$ -гибридизацией атома углерода в алканах, где четыре связи направлены к вершинам тетраэдра). Обратите внимание, что в образовании гибридных орбиталей принимают участие  $d$ -орбитали с таким же порядковым номером, что и  $s$ ,  $p$ -орбитали. Это объясняется тем, что расположенные ниже по энергии внутренние  $d$ -орбитали заняты собственными электронами иона металла. Для того чтобы занять расположенные ниже по энергии орбитали, лиганды должны вынудить собственные электроны иона металла спариться и освободить внутренние  $d$ -орбитали для так называемой  $d^2sp^3$ -гибридизации. Это могут сделать только лиганды сильного поля, образующие прочные связи с ионом металла, например цианид-ионы в комплексном гексацианоферрате(II) (см. рис. 4.7.3).

Соответственно первый тип комплексов, обладающий высоким магнитным моментом, называется внешнеорбитальным комплексом, а второй тип с пониженным магнитным моментом — внутриорбитальным комплексом. Это различие, приводящее к изменению числа неспаренных электронов в комплексе, приводит к изменению магнитных моментов внешне- и внутриорбитальных комплексов соответственно и, вызвано энергетической неравноценностью соответствующих  $d$ -орбиталей (обычно ее называют энергией расщепления в поле лигандов и обозначают  $A$  или  $10Dq$  [6]).

По способности образовывать внутриорбитальные комплексы (по величине  $A$ ) все лиганды можно расположить в ряд, который называется спектрохимическим рядом лигандов



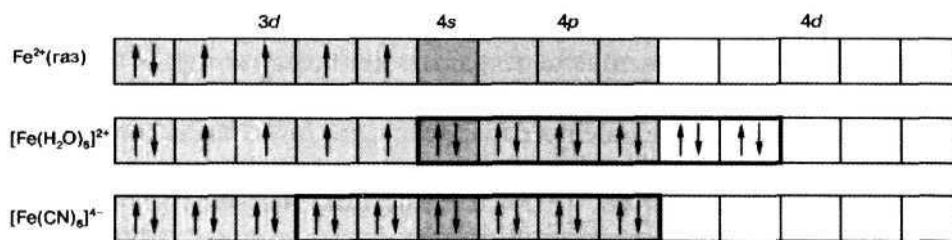


Рис. 4.7.3. Электронное строение внешне- и внутриорбитальных комплексов железа (II)

Он получил свое название, потому что окраска комплекса зависит от положения лиганда в этом ряду, и в этом проявляется связь оптических и магнитных свойств координационных соединений [6].

Таким образом, измеряя магнитную восприимчивость, можно легко судить о степени окисления и геометрии первой координационной сферы в комплексе. Данные по магнитной восприимчивости ряда ионов переходных металлов и лантанидов приведены в табл. 2. Видно, что магнитные свойства 3d-ионов в большинстве случаев хорошо соответствуют чисто спиновым значениям  $\mu_5$ , а для объяснения магнитных свойств лантанидов требуется уже более сложная модель с привлечением упомянутого выше квантового числа  $J$ .

Известно, что большинство важных на практике химических реакций протекают в растворах, к ним относятся также и реакции комплексообразования, поэтому в следующем разделе рассмотрим магнитные свойства растворов, в которых соединения переходных металлов реализуются в виде комплексов.

## Магнитная восприимчивость растворов

При переходе от твердого тела к раствору следует учитывать магнитные восприимчивости растворителя и всех растворенных веществ. При этом простейшим способом такого учета будет суммирование вкладов всех компонентов раствора по правилу аддитивности. Принцип аддитивности – один из основополагающих принципов в обработке экспериментальных данных. Временами он даже подводит экспериментаторов, потому что человеческому разуму трудно представить себе другой механизм взаимодействия разнообразных факторов, помимо простого их сложения. Любые отклонения от него чаще связывают с тем, что сам принцип аддитивности выполняется, а компоненты раствора изменяют свои свойства. Поэтому принимается, что магнитная восприимчивость раствора равна сумме магнитных восприимчивостей отдельных компонентов с учетом концентрации

$$\chi_v = \frac{1}{1000} \sum_i c_i \chi_{mi},$$

где  $c_i$  — концентрация (в моль/л),  $\chi_{mi}$  — молярная магнитная восприимчивость  $i$ -го компонента раствора, коэффициент  $1/1000$  используется для перехода к молярной концентрации. При этом суммирование производится по всем растворенным веществам и растворителю [1]. Можно заметить, что вклады парамагнитных и диамагнитных веществ в измеряемую магнитную восприимчивость противоположны по знаку и их можно разделить

$$\chi_v(\text{изм}) = \chi_v(\text{пара}) - \chi_v(\text{диа})$$

При исследовании магнитных свойств одного и того же вещества в разных растворителях (табл. 3) видно, что они могут заметно зависеть от природы растворителя. Это можно объяснить вхождением молекул растворителя в первую координационную сферу и изменением соответственно электронного строения комплекса, энергий d-орбиталей ( $A$ ) и других свойств сольватокмплекса. Таким образом, магнетохимия позволяет изучать и сольватацию, то есть взаимодействие растворяемого вещества с растворителем.

В растворах определение  $\chi_m$  и  $\mu_{eff}$  координационных соединений позволяет, как это видно из изложенного выше теоретического материала, определить ряд структурных параметров ( $X$ ,  $S$ ,  $A$ ), что делает магнетохимические исследования весьма ценными. Разные комплексы одного и того же иона металла могут заметно отличаться по величине эффективного магнитного момента. На примере меди (II) видно, что при комплексообразовании эффективный магнитный момент увеличивается, а когда образуется димерный комплекс — уменьшается вследствие антиферромагнитного взаимодействия неспаренных электронов ионов меди (II).

Таблица 3.

### Влияние растворителя на магнитную восприимчивость $CoCl_2$ при 310 К

| Растворитель  | см, $10^6 \text{ см}^3 / \text{моль}$ | $\mu_{eff}$ , $\mu_B$ |
|---------------|---------------------------------------|-----------------------|
| Вода          | 10380                                 | 5,07                  |
| Метанол       | 10020                                 | 4,98                  |
| Этанол        | 9545                                  | 4,86                  |
| Триэтилфосфат | 9174                                  | 4,77                  |
| Ацетонитрил   | 9039                                  | 4,73                  |

Магнитные свойства комплексных соединений меди(II) приведены ниже. (При записи формул использованы сокращенные обозначения лигандов, принятые в координационной химии: асас -- ацетилацетон  $CH_3COCH_2COCH_3$ ,  $H_4Tart$  — винная кислота  $HOOC(CHOH)_2COOH$ ).

|                     |      |
|---------------------|------|
| Вещество            |      |
| $[Cu(H_2O)_6]^{2+}$ | 1,83 |
| $[CuCl_2]$          | 1,88 |
| $[Cu(NH_3)_4]^{2+}$ | 1,89 |
| $[Cu(acac)_2]^{2+}$ | 1,95 |
| $[CuH_2Tart]$       | 1,91 |
| $[Cu_2(HTart)_2]$   | 1,73 |

Несколько слов о "магнитной" воде, точнее, о водных растворах (поскольку даже в дистиллированной воде содержатся примеси, например растворенный кислород, а он парамагнитен). Эта тема, конечно, требует отдельного рассмотрения, мы затронем ее лишь в связи с магнетохимией. Если магнитное поле влияет на свойства раствора, а многочисленные экспериментальные факты (измерения плотности, вязкости, электропроводности, концентрации протонов, магнитной восприимчивости) свидетельствуют, что это так [7], то следует признать, что энергия взаимодействий отдельных компонентов раствора и ансамбля молекул воды достаточно высока, то есть сопоставима или превышает энергию теплового движения частиц в растворе, которое усредняет всякое воздействие на раствор. Напомним, что энергия магнитного взаимодействия одной частицы (молекулы) мала по сравнению с энергией теплового движения. Такое взаимодействие возможно, если принять, что в воде и водных растворах за счет кооперативного характера водородных связей реализуются большие льдоподобные структурные ансамбли молекул воды, которые могут упрочняться или разрушаться под воздействием растворенных веществ [7]. Энергия образования таких "ансамблей", по-видимому, сопоставима с энергией теплового движения и под магнитным воздействием раствор может запомнить его и приобрести новые свойства, но броуновское движение или повышение температуры ликвидирует эту "память" в течение некоторого времени.

Обратите внимание, что, точно подбирая концентрации парамагнитных веществ в диамагнитном растворителе, можно создать немагнитную жидкость, то есть такую, средняя магнитная восприимчивость которой равна нулю или в которой магнитные поля распространяются точно так же, как и в вакууме. Это интересное свойство пока не нашло применения в технике.

## Литература

1. Сальников Ю.И., Глебов А.Н., Девятое Ф.В. Магнетохимия и радиоспектроскопия координационных соединений. Казань: Изд-во Казан. ун-та, 1989. С. 4-33.
2. Каганов М.И., Цукерник В.М. Природа магнетизма. М.: Наука, 1982. 192 с. (Б-чка "Квант"; Вып. 16).



3. *Ракитин Ю.В., Калинин В.Т.* Современная магнетохимия. СПб.: Наука, 1994. С. 18-30.
4. *Вульфсон С.Г.* Молекулярная магнетохимия. М.: Наука, 1991. 262 с.
5. *Керрингтон А., Мак-Лечлан Э.* Магнитный резонанс и его применение в химии: Пер. с англ. М.: Мир, 1970. 447 с.
6. *Макашев Ю.А., Замяткина В.М.* Соединения в квадратных скобках. Л.: Химия, 1976. 216 с.
7. *Сокольский Ю.М.* Омагниченная вода: правда и вымысел. Л.: Химия, 1990. 144 с.

Источник: <http://www.pereplet.ru/>

## 4.8. Акустомагнитоэлектрический эффект

**Акустомагнитоэлектрический эффект** - возникновение поперечной ЭДС под действием УЗ-волны в твердом проводнике, помещенном в магнитное поле. Акустомагнитоэлектрический эффект обусловлен увлечением носителей заряда УЗ-волной (см. Акустоэлектрический эффект) и отклонением потоков носителей заряда магнитным полем. При прохождении ультразвука через проводник с биполярной проводимостью (собственно полупроводник, полуметалл) возникают потоки электронов проводимости и дырок в направлении распространения УЗ. Под действием перпендикулярного к ним магнитного поля эти потоки отклоняются в противоположные стороны. В результате возникает эдс (или ток в случае электрически замкнутого проводника) в направлении, перпендикулярном к магнитному полю и к УЗ-потoku. Таким образом, акустомагнитоэлектрический эффект в биполярных проводниках аналогичен фотомагнитоэлектрическому эффекту с той разницей, что потоки электронов и дырок обусловлены не градиентом концентрации носителей, вызванным неоднородным освещением образца, а УЗ-волной.

В монополярных проводниках (примесных полупроводниках) происхождение акустомагнитоэлектрического эффекта сложнее. Если в направлении УЗ-потока образец электрически замкнут, то имеет место акустоэлектрический эффект Холла, отличающийся от обычного Холла эффекта тем, что продольный (диссипативный) ток создается не внешним электрическим полем, а УЗ-потоком. Если же в направлении распространения УЗ-потока образец разомкнут, то возникает акустоэлектрическое поле, которое компенсирует действие УЗ-волны на носители заряда так, что полный электрический ток в направлении УЗ-потока будет равен нулю. Однако такая компенсация воздействия УЗ-потока акустоэлектрическим полем имеет место не для каждого электрона в отдельности, а лишь для некоторого "среднего" электрона. Изменение распределения электронов по импульсам под действием УЗ-потока по своему виду существенно отличается от того, которое вызывается электрическим полем. Поэтому в зависимости от энергии для одних электронов преобладающим

оказывается воздействие УЗ-потока, для других — воздействие компенсирующего акустоэлектрического поля. В результате при равенстве нулю полного акустоэлектрического (продольного) тока в образце будут существовать взаимно компенсирующиеся "парциальные" токи, создаваемые группами энергетически различных электронов. Вследствие зависимости времени свободного пробега электронов от их энергии средние подвижности электронов в этих "парциальных" токах будут в общем случае различны. Токи Холла, образуемые этими группами электронов, не будут компенсировать друг друга, и в направлении, перпендикулярном к магнитному полю и УЗ-потоку, возникнут отличные от нуля акустомагнитоэлектрический ток (если образец замкнут в этом направлении) или эдс (если образец разомкнут). Величина и даже знак акустомагнитоэлектрического эффекта в примесных полупроводниках зависят от механизма рассеяния носителей заряда.

Акустомагнитоэлектрическое поле по порядку величины равно:

$$E \sim \frac{\alpha W}{ens} \cdot \frac{\mu^{H/c}}{1 + (\mu^{H/c})^2},$$

где  $e$  — заряд электрона,  $s$  — скорость звука,  $\alpha$  — коэффициент поглощения звука,  $W$  — плотность потока звуковой энергии,  $\mu$  — подвижность носителей тока,  $n$  — концентрация носителей тока,  $H$  — напряженность магнитного поля.

Акустомагнитоэлектрический эффект возможен также в планарной конфигурации, когда векторы звукового потока, магнитного поля и акустомагнитоэлектрического поля лежат в одной плоскости. В этом случае акустомагнитоэлектрический эффект является эффектом, четным по магнитному полю.

Первоначально предсказанный теоретически, акустомагнитоэлектрический эффект в дальнейшем был обнаружен экспериментально в (биполярных) полуметаллах (*Bi*, графит) и монополярных полупроводниках (*InSb*, *Te*). Подобно фотомагнитоэлектрическому эффекту, биполярный акустомагнитоэлектрический эффект может быть использован для измерения скорости поверхностной рекомбинации и времени жизни носителей заряда в полупроводниках. Изучение акустомагнитоэлектрического эффекта в монополярных полупроводниках дает информацию о механизмах рассеяния носителей.

## 4.9. Магнитная анизотропия и магнитострикция

### 4.9.1. Анизотропия ферромагнетиков

Хотя магнитное взаимодействие является малой поправкой к электрическим обменным силам, обуславливающим самопроизвольную намагниченность, тем не менее, они играют решающую роль во всем сложном комплексе явлений технического намагничивания. Поэтому выяснение физической природы магнитного взаимодействия в ферромагнетиках имеет не только теоре-

тическое значение, но необходимо и для ясного понимания механизма тех физических процессов, которые обуславливают всю практическую ценность явления ферромагнетизма.

Напомним, что ферромагнетиками называются вещества, в которых магнитные моменты ориентированы вдоль выделенного направления.

Монокристаллы ферромагнетиков анизотропны в магнитном отношении. В качестве примера магнитокристаллической анизотропии на рис.4.9.1 приведены кривые намагничивания  $I(H)$  монокристалла кобальта, снятые вдоль гексагональной оси (ось  $c$ ) и перпендикулярно к ней (ось  $a$ ). Как видно из рисунка, если магнитное поле  $H \parallel c$ , то достаточно приложить поле в несколько сот эрстед для того, чтобы намагнитить кристалл до насыщения. При  $H \perp c$  насыщение достигается только при  $H \sim 10^4$  Э.

Наиболее резко магнитная анизотропия, проявляется в кристаллах гексагональной симметрии ( $Co$ ,  $Tb$ ,  $Dy$ ). Из анализа кривых  $I(H)$ , снятых по различным кристаллографическим направлениям, следует, что в ферромагнитных монокристаллах существуют направления, называемые "осями легкого намагничивания" (ОЛН), и направления, называемые "осями трудного намагничивания" (ОТН).

Известно, что минимум свободной энергии магнитокристаллической анизотропии достигается, когда намагниченность ориентирована вдоль ОЛН. Для поворота  $I_s$  из этих направлений требуется затрата определенной работы, которая приводит к росту энергии магнитной или магнитокристаллической анизотропии. Энергией магнитокристаллической анизотропии называют ту часть энергии кристалла, которая зависит от ориентации вектора намагниченности относительно кристаллографических осей.

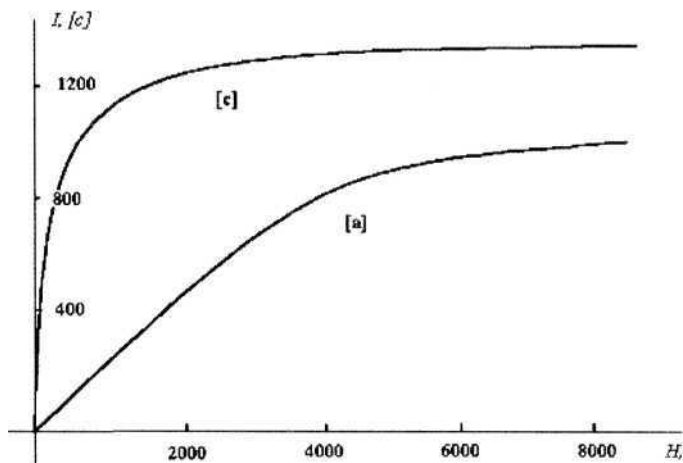


Рис. 4.9.1. Кривые намагничивания  $I(H)$  монокристалла кобальта, снятые вдоль гексагональной оси (ось  $c$ ) и перпендикулярно к ней (ось  $a$ )

В случае кобальта эта энергия минимальна, если намагниченность направлена вдоль оси  $c$  (при комнатной температуре). При вращении намагниченности  $I_s$  от оси  $c$  энергия анизотропии увеличивается с увеличением угла  $\nu$  между осью  $c$  и направлением  $I_s$ , достигает максимума при  $\nu=90^\circ$ , т. е. при  $I_s \perp c$ , и затем уменьшается до первоначального значения при  $\nu=180^\circ$ .

#### 4.9.2. Спонтанная магнитострикция и ее вклад в магнитную анизотропию

При возможных изменениях ориентации самопроизвольной намагниченности в кристалле изменяются равновесные расстояния между узлами решетки. Поэтому возникают самопроизвольные *магнитострикционные* деформации, т.е.

**Опр.** При перемагничивании ферромагнетика имеет место магнитное взаимодействие электронов, которое влияет на межатомное расстояние, вызывая деформацию кристаллической решетки, что сопровождается изменением линейных размеров тела и появлением соответствующей магнитоупругой энергии. Это явление называется *магнитострикцией*.

В частном случае кубического кристалла в отсутствие внешних напряжений свободная энергия магнитного и упругого взаимодействия (с точностью до шестых степеней в направляющих косинусах вектора  $I_s$  и вторых степеней тензора магнитострикционных напряжений), равна сумме энергии магнито-кристаллической анизотропии  $f_a$ , упругой энергии  $f_{ynp}$  и магнитоупругой энергии  $f_{\mu y}$ :

$$f_a(\alpha_i, e_{ij}) = f_a(\alpha_i, e_{ij}) + f_{ynp}(\alpha_i, e_{ij}) + f_{\mu y}(\alpha_i, e_{ij}) \quad (1)$$

1) Можно феноменологическим путем получить выражение плотности энергии магнитной анизотропии, раскладывая эту энергию в ряд по степеням направляющих косинусов вектора намагниченности  $\alpha_i$  относительно осей симметрии кристалла. Сначала найдем выражение  $f_a$  для кобальта, имеющего гексагональную решетку с ОЛН —  $c$ , для которого  $\alpha_i = \alpha = \cos(I_s, c) = \cos \nu$ . Для гексагональной решетки, обладающей центром симметрии, операция замены  $\alpha$  на  $-\alpha$  должна оставлять энергию инвариантной относительно такого преобразования симметрии. Следовательно, в разложении останутся только члены с четными степенями  $\alpha$ , т. е.

$$f_a = K'_{1\alpha^2} + K'_{2\alpha^4} + \dots \quad (2)$$

где  $K'_{1\alpha^2}$  и  $K'_{2\alpha^4}$  и т. д. — параметры магнитной анизотропии;  $f_a$  чаще записывают в следующем виде:

$$f_a = K_1 \sin^2 \vartheta + K_2 \sin^4 \vartheta + \dots, \quad (3)$$

где  $K_1$  и  $K_2$  называют 1-й и 2-й константами магнитной анизотропии. Энергия анизотропии кристаллов гексагональной системы в общем случае должна зависеть от азимута  $\varphi$ . Но эта зависимость является очень слабой, и ею обычно пренебрегают. Для кубических кристаллов, таких как *Fe*, *Ni*, энергия анизотропии выражается в функции направляющих косинусов ( $\alpha_1$ ,  $\alpha_2$ ,  $\alpha_3$ ) намагниченности  $I_s$  относительно трех ребер куба:

$$(\alpha_1 = \cos(I_s, [100]); \alpha_2 = \cos(I_s, [010]); \alpha_3 = \cos(I_s, [001])). \quad (4)$$

Энергия анизотропии должна быть такой функцией  $\alpha_1$ ,  $\alpha_2$ ,  $\alpha_3$ , которая оставалась бы инвариантной при преобразованиях симметрии кубического кристалла.

В кубическом кристалле плоскости типа  $[100]$  являются плоскостями симметрии. Зеркальное отражение вектора  $I_s$  в такой плоскости должно оставлять функцию  $f_a(\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3)$  инвариантной. Отражение, например, в плоскости (100) заменяет  $\alpha_1$  на  $-\alpha_1$  оставляя  $\alpha_2$  и  $\alpha_3$  неизменными. Аналогично зеркальное отражение в плоскостях (010) и (001) изменяет знаки соответственно у  $\alpha_2$  и  $\alpha_3$ . Следовательно, функция  $f_a(\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3)$  должна быть инвариантной относительно преобразований

$$\alpha_i \rightarrow -\alpha_i \quad (i = 1, 2, 3) \quad (5)$$

Кубический кристалл имеет также плоскости симметрии типа {ПО}. Отражение в этих плоскостях соответствует преобразованиям

$$\alpha_i \rightarrow -\alpha_j \quad (i \neq j = 1, 2, 3) \quad (6)$$

Первым членом разложения энергии анизотропии кубического кристалла по степеням  $\alpha_1$ ,  $\alpha_2$ ,  $\alpha_3$ , удовлетворяющим требованиям симметрии (5,6), является  $\alpha_1^2 + \alpha_2^2 + \alpha_3^2$ , но этот член разложения всегда равен единице и, следовательно, не описывает эффекта анизотропии.

Следующий член (четвертого порядка относительно  $\alpha_i$ ),  $\alpha_1^4 + \alpha_2^4 + \alpha_3^4$  может быть приведен к виду

$$\alpha_1^4 + \alpha_2^4 + \alpha_3^4 = 1 - 2(\alpha_1^2 \alpha_2^2 + \alpha_2^2 \alpha_3^2 + \alpha_1^2 \alpha_3^2) \quad (7)$$

так как  $(\alpha_1^2 + \alpha_2^2 + \alpha_3^2)^2 = 1$ . Далее, член шестого порядка приводится к виду

$$\alpha_1^4 + \alpha_2^4 + \alpha_3^4 = 1 - 3(\alpha_1^2 \alpha_2^2 + \alpha_2^2 \alpha_3^2 + \alpha_1^2 \alpha_3^2) + 3\alpha_1^2 \alpha_2^2 \alpha_3^2 \quad (8)$$

так как  $(\alpha_1^2 + \alpha_2^2 + \alpha_3^2)^3 = 1$ .

Энергия анизотропии на единицу объема кубического кристалла с точностью до членов шестого порядка относительно  $\alpha_i$  представляется в виде линейной комбинации

$$f_a = K_1(\alpha_1^2 \alpha_2^2 + \alpha_2^2 \alpha_3^2 + \alpha_1^2 \alpha_3^2) + K_2 \alpha_1^2 \alpha_2^2 \alpha_3^2 \quad (9)$$

Часто членом  $K_2 \alpha_1^2 \alpha_2^2 \alpha_3^2$ , который обычно меньше первого члена в (9), пренебрегают. Тогда:

$$f_a = K_1(\alpha_1^2 \alpha_2^2 + \alpha_2^2 \alpha_3^2 + \alpha_1^2 \alpha_3^2) \quad (10)$$

Знаки констант анизотропии  $K_1$  и  $K_2$  и их относительная величина определяют то кристаллографическое направление, которое в данном кристалле будет "легким".

Если  $K_1 > 0$ , то первый член в (9) минимален при направлении намагниченности вдоль осей [100], [010], [001], которые в этом случае являются осями легкого намагничивания.

Если  $K_1 < 0$ , то осями легкого намагничивания являются оси [111],  $\bar{[111]}$ , [111],  $\bar{[111]}$ , так как первый член в энергии анизотропии (9) минимален, когда намагниченность расположена вдоль этих осей.

Если учитывать и второй член в (9), то направление диагональной оси [100] в тех случаях, когда  $K_1$  отрицательна и меньше по абсолютной величине, чем  $K_2$ , также может быть направлением легкого намагничивания.

В заключение отметим, что в ряде случаев удобнее  $f_a$  раскладывать в ряд по сферическим функциям  $Y_l^m(\vartheta, \varphi)$  где  $\vartheta$  — полярный угол,  $\varphi$  — азимут вектора намагниченности по отношению к выбранной оси симметрии. Тогда

$$f_a = \sum_l \sum_m \chi_l^m Y_l^m(\vartheta, \varphi), \quad (11)$$

где  $\chi_l^m$  — параметры, аналогичные константам анизотропии. Разложение (11) справедливо для кристаллов любой симметрии (тип симметрии определяют величины  $\chi_l^m$ , т. е. какие из этих коэффициентов обращаются в нуль).

$$2) \quad f_{\text{гип.}}(e_{ij}) = \frac{1}{2}[C_{11}(e_{xx}^2 + e_{yy}^2 + e_{zz}^2)] + \frac{1}{2}[C_{44}(e_{xy}^2 + e_{yz}^2 + e_{xz}^2)] + C_{12}(e_{xx}e_{yy} + e_{yy}e_{zz} + e_{xx}e_{zz}) \quad (12)$$

$$3) \quad f_{my}(\alpha_i, e_{ij}) = B_1[(\alpha_1^2 - 1/3)e_{xx} + (\alpha_2^2 - 1/3)e_{yy} + (\alpha_3^2 - 1/3)e_{zz}] +, \\ + B_2[\alpha_1\alpha_2e_{xy} + \alpha_2\alpha_3e_{yz} + \alpha_1\alpha_3e_{xz}] \quad (13)$$

где,  $a_i$  — направляющие косинусы вектора спонтанной намагниченности,  $e_{ij}$  — компоненты тензора деформации кристалла,  $B_1, B_2$  — константы магнитоупругой энергии,  $C_{11}, C_{44}, C_{14}$  — модули упругости.

Устойчивому равновесному состоянию деформированного кристалла с определенным направлением намагниченности ( $a_i = \text{const}$ ) соответствует минимум свободной энергии. Чтобы определить компоненты тензора деформации при отсутствии внешних напряжений, характеризующие спонтанную магнитострикционную деформацию или спонтанную магнитострикцию, следует найти компоненты  $e_{ij}^{(0)}$ , соответствующие минимуму  $f$ .

Минимизируя выражения для плотности энергии  $f$  относительно  $e_{ij}$ , получим

$$\begin{aligned} \partial f / \partial e_{xx} &= B_1(\alpha_1^2 - 1/3) + C_{11}e_{xx}^{(0)} + C_{11}(e_{yy}^{(0)} + e_{zz}^{(0)}) = 0, \\ \partial f / \partial e_{yy} &= B_1(\alpha_2^2 - 1/3) + C_{11}e_{yy}^{(0)} + C_{12}(e_{zz}^{(0)} + e_{xx}^{(0)}) = 0, \\ \partial f / \partial e_{zz} &= B_1(\alpha_3^2 - 1/3) + C_{11}e_{zz}^{(0)} + C_{12}(e_{xx}^{(0)} + e_{yy}^{(0)}) = 0, \end{aligned} \quad (14)$$

$$\begin{aligned} \partial f / \partial e_{zy} &= B_2\alpha_1\alpha_2 + C_{44}e_{xy}^{(0)} = 0, \\ \partial f / \partial e_{yz} &= B_2\alpha_2\alpha_3 + C_{44}e_{yz}^{(0)} = 0, \\ \partial f / \partial e_{xz} &= B_2\alpha_1\alpha_3 + C_{44}e_{xz}^{(0)} = 0, \end{aligned} \quad (15)$$

Складывая три уравнения (14), найдем:  $(\Delta V/V)_0 = e_{xx}^{(0)} + e_{yy}^{(0)} + e_{zz}^{(0)}$ , т.е. в этом приближении изменение объема кристалла  $(\Delta V/V)_0$  при спонтанной магнитострикционной деформации равно нулю. Из (14) и (15) получим компоненты тензора этой деформации

$$e_{ii}^{(0)} = -[B_1/(C_{11} - C_{12})][\alpha_i^2 - 1/3], \quad e_{ij}^{(0)} = -(B_2/C_{44})\alpha_i\alpha_j; \quad i, j = x, y, z. \quad (16)$$

Зная  $e_{ij}^{(0)}$  легко найти удлинение кристалла  $\delta l/l$  при спонтанной магнитострикционной деформации в любом направлении, определяемом направляющими косинусами  $\beta_1, \beta_2, \beta_3$ :

$$\begin{aligned} (\delta l/l)_0 &= e_{xx}^{(0)}\beta_1^2 + e_{yy}^{(0)}\beta_2^2 + e_{zz}^{(0)}\beta_3^2 + e_{xy}^{(0)}\beta_1\beta_2 + e_{yz}^{(0)}\beta_2\beta_3 + e_{zx}^{(0)}\beta_3\beta_1 = \\ &= -[B_1/(C_{11} - C_{12})][\alpha_1^2\beta_1^2 + \alpha_2^2\beta_2^2 + \alpha_3^2\beta_3^2 - 1/3] - \\ &- (B_2/C_{44})(\alpha_1\alpha_2\beta_1\beta_2 + \alpha_2\alpha_3\beta_2\beta_3 + \alpha_3\alpha_1\beta_3\beta_1) \end{aligned} \quad (17)$$

Найдем  $\delta l/l$  для кристаллографических направлений  $[100]$  и  $[111]$ . Если кристалл намагничен вдоль направления  $[100]$ , то, полагая в (17)

$\alpha_1 = \beta_1 = 1, \alpha_2 = \alpha_3 = \beta_2 = \beta_3 = 0$ , получим

$$(\delta l/l)_{[100]} = \lambda_{100} = -2/3[B_1/(C_{11} - C_{12})]. \quad (18)$$

Аналогично для направления  $[111]$  будем иметь

$$(\delta l/l)_{[111]} = \lambda_{111} = -1/3(B_2/C_{44}), \quad (19)$$

где  $\lambda_{100}$  и  $\lambda_{111}$  носят название констант магнитострикции. Подставляя в (18,19). Выражения для констант магнитоупругой энергии:

$$B_1 = N(\partial g_1/\partial r)r_0, \quad B_2 = 2Ng_1, \quad (20)$$

где  $N$  — число атомов в единице объема. Можно выразить магнитострикционные константы  $\lambda_{100}$  и  $\lambda_{111}$  для различных типов кубических решеток через коэффициенты  $g_i$  в выражении для энергии пары атомов:

1 — простая кубическая:

$$\begin{aligned} \lambda_{100} &= -2/3[N/(C_{11} - C_{12})][\partial g_1/\partial r]r_0; \\ \lambda_{111} &= -4/3(N/C_{44})g_1 \end{aligned}$$

2 — объемно-центрированная:

$$\begin{aligned} \lambda_{100} &= -16/9[N/(C_{11} - C_{12})]g_1; \\ \lambda_{111} &= -16/27[g_1 + (\partial g_1/\partial r)r_0] \end{aligned}$$

3 — гранецентрированная:

$$\begin{aligned} \lambda_{100} &= -1/3[N/(C_{11} - C_{12})][6g_1 - (\partial g_1/\partial r)r_0]; \\ \lambda_{111} &= -4/3[N/C_{44}][2g_1 + (\partial g_1/\partial r)r_0] \end{aligned}$$

Принимая во внимание (16), магнитоупругую (13) и упругую (12) энергии при спонтанной деформации можно записать в виде:

$$\begin{aligned} f_{\text{мг}}^{(0)} &= [B_1^2/(C_{11} - C_{12})]\sum(\alpha_i^2 - 1/3)^2 - B_2^2/C_{44}\sum\alpha_i^2\alpha_j^2, \quad (i, j = 1, 2, 3) \\ f_{\text{уп}}^{(0)} &= 1/2C_{11}[B_1^2/(C_{11} - C_{12})^2]\sum(\alpha_i^2 - 1/3)^2 + 1/2C_{44}B_2^2\sum\alpha_i^2\alpha_j^2 + \\ &+ C_{12}[B_1^2/(C_{11} - C_{12})^2]\sum(\alpha_i^2 - 1/3)(\alpha_j^2 - 1/3), \quad (i, j = 1, 2, 3) \end{aligned}$$

или, учитывая соотношения



$$1) \sum \alpha_i^2 = 1 \quad (i=1,2,3) ;$$

$$2) \sum \alpha_i^4 = 1 - 2 \sum \alpha_i^2 \alpha_j^2 \quad (i, j=1,2,3) ;$$

$$3) \sum (\alpha_i^2 - 1/3)^2 = 2/3 - 2 \sum \alpha_i^2 \alpha_j^2 \quad (i, j=1,2,3, i > j) ;$$

$$4) \sum (\alpha_i^2 - 1/3)(\alpha_j^2 - 1/3) = \sum \alpha_i^2 \alpha_j^2 - 1/3 \quad (i, j=1,2,3, i > j) ;$$

$$f_{\text{мн}}^{(0)} = -[B_1^2/(C_{11} - C_{12})][2/3 - 2 \sum \alpha_i^2 \alpha_j^2] - B_2^2/C_{44} \sum \alpha_i^2 \alpha_j^2, \quad (i, j=1,2,3, i > j) \quad (22)$$

$$f_{\text{нп}}^{(0)} = 1/2 C_{11} [B_1^2/(C_{11} - C_{12})^2][2/3 - 2 \sum \alpha_i^2 \alpha_j^2] + 1/2 C_{44} B_2^2 + \\ + C_{12} [B_1^2/(C_{11} - C_{12})^2] \sum (\alpha_i^2 \alpha_j^2 - 1/3), \quad (i, j = 1, 2, 3, i > j) \quad (23)$$

Подставляя (21) и (23) в (1) и учитывая (10), (18) и (19), получим следующее выражение для плотности анизотропной части магнитной энергии кристалла при отсутствии упругих внешних напряжений:

$$f = (K_1 + \Delta K_1) \sum \alpha_i^2 \alpha_j^2 \quad (i, j=1,2,3, i > j) \quad (24)$$

где добавка  $\Delta K_1$  к первой константе анизотропии, обусловленная спонтанной магнитострикционной деформацией равна

$$\Delta K_1 = [2B_1^2/(C_{11} - C_{12})] + [B_2^2/C_{44}] - [C_{11}(B_1^2/(C_{11} - C_{12})^2)] + \\ + [1/2 C_{44}(B_2^2/C_{44}^2)] + [C_{12}(B_1^2/(C_{11} - C_{12})^2)] = \\ = [B_1^2/(C_{11} - C_{12})] - 1/2 [B_2^2/C_{44}] = 9/4 \lambda_{100}^2 (C_{11} - C_{12}) - 9/2 \lambda_{111}^2 C_{44} \quad (25)$$

Как видно из (24), вид зависимости плотности энергии от направляющих косинусов не изменился, но константа анизотропии благодаря спонтанной деформации решетки увеличилась.

### 4.9.3. Физическая природа естественной магнитной анизотропии

В первых работах Акулова магнитное взаимодействие в ферромагнитных кристаллах с микроскопической точки зрения трактовалось чисто классическим путем. Квантовомеханическая трактовка была дана в работах Блоха и Дженгиля. Классическую теорию температурной зависимости констант магнитной анизотропии развили Акулов и Зинер, исходя из представления о том, что около каждого узла решетки можно выделить области ближнего магнит-

ного порядка с не зависящими от температуры локальными константами анизотропии. Локальные мгновенные намагниченности этих областей из-за теплового движения распределены хаотически и образуют среднюю намагниченность всего кристалла. Отсюда удается определить связь между температурным ходом констант анизотропии и намагниченности в виде

$$K_n(T)/K_n(0) = [I_s(T)/I_s(0)]^{n(2n+1)}$$

где  $n$  — порядок константы. Таким образом, мы приходим к универсальной зависимости  $K_1 \sim I_s^3$  и  $K_2 \sim I_s^{10}$ . Результат (26) получается в приближении теории молекулярного поля. Микроскопические трактовки этой проблемы даны в работах Ван-флека и Канамори.

В основе всех расчетов по микроскопической теории магнитной анизотропии лежит учет магнитного взаимодействия между спиновыми и орбитальными магнитными моментами электронов, принимающих участие в ферромагнетизме. В общем случае оператор магнитной энергии складывается из трех членов.

$$H_{\text{магн.}} = U_1 + U_2 + U_3 ,$$

где  $U_1$  — оператор, соответствующий движению электронов относительно ионов решетки, — спин-орбитальная энергия;  $U_2$  — оператор магнитной энергии, возникающей вследствие относительного движения самих электронов, "орбитальная энергия;  $U_3$  — оператор энергии магнитного взаимодействия спиновых магнитных моментов электронов — спиновая энергия (в первом приближении имеет вид дипольного взаимодействия).

Эффект орбитального взаимодействия  $U_1$  и  $U_2$  проявляющийся в случае изолированных атомов в образовании тонкой структуры спектральных линий приводит к появлению "внутренних магнитных полей" порядка  $10^5$  э. С другой стороны, "эквивалентное магнитное поле" анизотропии ферромагнетиков, определяемое величиной поля, при котором достигается насыщение в монокристалле вдоль труднейших направлений намагничивания, оказывается порядка  $10^2$  э и лишь в редких случаях (Co, пирротин) достигает  $10^3$ - $10^4$  э. Объяснение этого несоответствия заключается в том, что в отличие от атомов, где орбитальные моменты отличны от нуля (за исключением s-состояний), в ферромагнитных кристаллах (например, в d-металлах и сплавах), как показывают измерения гиромагнитного эффекта, средний орбитальный магнитный момент по кристаллу почти всегда практически равен нулю. Поэтому в первом приближении эффект спин-орбитальных энергий  $U_1$  и  $U_2$  также равен нулю. Отличный от нуля эффект получается лишь во втором и более высоких приближениях.

Что же касается спиновой части магнитного взаимодействия  $U_3$ , которая хотя и дает отличный от нуля эффект в первом приближении, но тем не менее не обеспечивает наблюдаемый на опыте порядок величины эффективных "полей" благодаря своей малости.

Несмотря на отсутствие законченной квантовой трактовки магнитного взаимодействия в ферромагнетиках, в этой области имеются известные успехи. Так, например, удалось объяснить правильный порядок величины констант магнитной анизотропии. В частности, без всяких дополнительных соображений из теории следует, что в кубических кристаллах (*Fe*, *Ni*) константы анизотропии должны быть меньше по абсолютной величине, чем в случае гексагональных кристаллов (*Co*, пирротин). Это вытекает из свойств симметрии кубических кристаллов, в которых первое приближение для дипольной энергии  $U_3$  и второе приближение для орбитальных энергий  $U_1$  и  $U_2$  не приводит к зависимости свободной энергии кристалла от ориентации его намагниченности относительно кристаллографических осей. Для получения этой зависимости надо рассматривать следующие приближения, в то время как в гексагональных решетках анизотропия получается и в первом приближении для  $U_3$ , и во втором для  $U_1$  и  $U_2$ .

Остановимся несколько подробнее на микромеханизме явления естественной кристаллографической магнитной анизотропии. Поскольку в создании самопроизвольной намагниченности ферро- и антиферромагнетиков основную роль играют электронные спины, то микроскопическая энергия, ответственная за магнитную анизотропию, должна зависеть от состояния этих спинов в кристалле, а также отражать симметрию распределения спиновой и зарядовой (орбитальной) плотности в кристалле. Наиболее простым является механизм магнитного дипольного взаимодействия спинов.

К сожалению, однако, учет лишь дипольного межэлектронного взаимодействия не может, как правило, объяснить наблюдаемую на опыте величину энергии магнитной анизотропии.

Другой из упомянутых выше механизмов заключается в связи между спином и орбитальным движением электронов [например, описываемой членами  $U_1$  и  $U_2$  гамильтониана (27)].

Киттель дает следующее наглядное объяснение физического механизма магнитной анизотропии из-за спин-орбитальной связи. В основу своего объяснения они кладут общепризнанное положение, что, само появление этой анизотропии обусловлено совместным действием спин-орбитальной связи, частичного замораживания орбитальных моментов неоднородными кристаллическими полями и орбитальным обменным взаимодействием соседних атомов. Таким образом, самопроизвольная намагниченность кристалла "чувствует" ионную решетку через орбитальное движение магнитных электронов. Спины, участвующие в намагниченности, взаимодействуют с орбитальным движением с помощью спин-орбитальной связи, а орбитальное движение связано с решеткой полем лигандов.

Микроскопическая энергия, возникающая благодаря этому механизму, может быть в свою очередь двух типов:

1) спин-орбитальная связь, которая зависит от спиновых состояний двух или более ионов-носителей магнитного момента (*парная* модель магнитной анизотропии);

2) связь, зависящая от спинового состояния только отдельных ионов (*одноионная* модель магнитной анизотропии). Последний механизм оказывается наиболее близким к реальной ситуации, которая имеет место в неметаллических антиферро - и ферримагнетиках, в которых магнитоактивные ионы находятся в окружении магнитно-нейтральных анионов. Под действием поля лигандов, симметрия которого определяется типом кристалла, происходит расщепление уровней магнитного иона. В результате основному состоянию в зависимости от структуры кристаллической решетки будут соответствовать различные типы уровней, что приводит к магнитной анизотропии кристалла с магнитным порядком.

#### 4.9.4. Магнитострикция при техническом намагничивании

Известно, что в процессе технического намагничивания происходит смещение границ доменов и вращение вектора  $I_s$ . Рассмотрим, как эти процессы влияют на изменение длины кристалла с положительной константой магнитной анизотропии  $K_r$ .

Пусть внешнее магнитное поле параллельно оси  $[110]$  и в исходном состоянии объемы  $V_i$  доменов, намагниченных вдоль шести направлений легкого намагничивания, равновелики:  $V_{100}^0 = V_{\bar{1}00}^0 = V_{010}^0 = V_{0\bar{1}0}^0 = V_{001}^0 = V_{00\bar{1}}^0 = 1/6V$ , где  $V$  — объем кристалла.

**а) Смещение  $180^\circ$  доменных границ.** При этом домены, намагниченные вдоль направлений  $[100]$  и  $[\bar{1}00]$ , поглощаются доменами, намагниченными в направлениях  $[010]$  и  $[0\bar{1}0]$ . Изменения длины при смещении  $180^\circ$  доменных границ не происходит.

После того как смещение этих границ заканчивается, объемы доменов равны

$$V_{100}^0 = V_{010}^0 = 0.$$

При этом средняя намагниченность кристалла

$$I = 2/3(2)^{-1/2} I_s.$$

#### **б) Смещение $90^\circ$ границ.**

При этом домены, намагниченные вдоль направлений  $[100]$  и  $[010]$ , поглощают домены, намагниченные в направлениях  $[001]$  и  $[00\bar{1}]$ . В конце этого процесса объемы доменов равны  $V_{100} = V_{010} = V/2$ ,  $V_{001} = V_{00\bar{1}} = 0$  и средняя намагниченность кристалла

$$I = (2)^{-1/2} I_s$$

Относительное изменение длины, вызванное смещением 90 границ, будет при этом равно

$$\Delta l/l = 1/3[(\delta l/l)_{[001]} - (\delta l/l)_{[100]}] = 1/3[(\delta l/l)_{[001]} - (\delta l/l)_{[010]}] = (1/3)(3/4)\lambda_{100} = 1/4\lambda_{100} \quad (28)$$

где

$$\begin{aligned} (\delta l/l)_{[001]}(\alpha_1 = \alpha_2 = 0, \alpha_3 = 1), \\ (\delta l/l)_{[100]}(\alpha_2 = \alpha_3 = 0, \alpha_1 = 1), \\ (\delta l/l)_{[010]}(\alpha_1 = \alpha_3 = 0, \alpha_2 = 1), \end{aligned}$$

Отметим, что формула (28) определяет лишь конечное изменение длины, соответствующее намагниченности  $I = (2)^{-1/2} I_s$ , при которой заканчивается процесс смещения 90 границ при условии, что вклад в намагниченность от процессов вращения еще пренебрежимо мал.

в) Вращение. Если процессы смещения 180 и 90 границ заканчиваются в слабых магнитных полях, при которых вклад в намагниченность от процессов вращения пренебрежимо мал, то можно считать, что при дальнейшем росте магнитного поля вращение векторов намагниченности доменов к оси [110] происходит в плоскости (001). Пусть  $\vartheta$  — угол между направлением намагниченности доменов и полем. Тогда намагниченность вдоль поля  $H$  равна  $I = I_s \cos \vartheta$ . Относительное удлинение вдоль оси [110] будет

$$(\delta l/l)_{[110]} = -1/2\lambda_{100} + 3/4\lambda_{100}(\alpha_1^2 + \alpha_2^2) + 3/2\lambda_{111}\alpha_1\alpha_2,$$

где  $\alpha_1 = \cos(\pi/4 - \vartheta)$ ,  $\alpha_2 = \sin(\pi/4 - \vartheta)$ , откуда

$$(\delta l/l)_{[110]} = -1/4\lambda_{100} + 3/4\lambda_{100}(2\cos^2\vartheta - 1) \approx 1/4\lambda_{100} + 3/4\lambda_{111}(2(\frac{I}{I_s})^2 - 1).$$

#### 4.9.5. Метод измерений и описание установки

На исследуемые в работе ферромагнитные образцы, наклеены проволоочные тензодатчики, изготовленные из тонкой константовой проволоки. Константан имеет очень малый температурный коэффициент омического сопротивления и пригоден для выполнения прецизионных измерений. В результате явление магнитострикции при намагничивании образца изменяются и линейные размеры тензодатчика, что приводит к изменению его омического сопротивления. По величине изменения омического сопротивления можно судить о величине магнитострикции. Коэффициент пропорциональности изменения омического сопротивления тензодатчика называют коэффициентом тензочувствительности.

На рис.2 приведена электрическая схема установки для измерения магнитострикции. Схема собрана в виде стенда с клеммами для подключения внешних приборов, а именно: источника постоянного напряжения 10В. и микровольтметра постоянного тока. Через клеммы также подключается тензодатчик исследуемого образца и источник постоянного магнитного поля (соленоид). Измерительный проволоочный тензодатчик ИТД является одним из плеч измерительного моста, во второе плечо которого включен компенсационный тензодатчик КТД, наклеенный на стальную полосу, находящуюся вне магнитного поля. Два других плеча измерительного моста образованы прецизионными резисторами  $R_1$  и  $R_2$ . Потенциометр  $R_3$  служит для грубой компенсации моста, а реоход  $R_4$  для точной компенсации. К диагонали измерительного моста через подвижный контакт реохода и клеммы х3, х4 "мкВ".

Подключается внешний микровольтметр. Резистор  $R_5$  задает ток питания датчиков. На стенде размещен также переменный резистор  $R_6$  для регулировки тока в соленоиде и, соответственно, амплитуды магнитного поля в нем. Конструктивно-технологические особенности выполнения измерений магнитострикции.

Измерение магнитострикции является прецизионным процессом, в силу малости измеряемой величины. Даже у никеля, имеющего одну из самых больших величин магнитострикции, она составляет всего  $30 \times 10^{-6}$ . Поэтому при питании тензодатчиков током порядка 5мА, разбаланс моста составляет в зависимости от величины  $\lambda$  от 1 до 10 мкВ, что соответствует изменению сопротивления тензодатчика  $10^{-4} - 10^{-3}$  Ом. Для сравнения: величина термоЭДС контакта медь-конктантан — 30 мкВ/град С, а переходные сопротивления контактов могут достигать величин десятых долей Ома, т.е. ,по крайней мере,

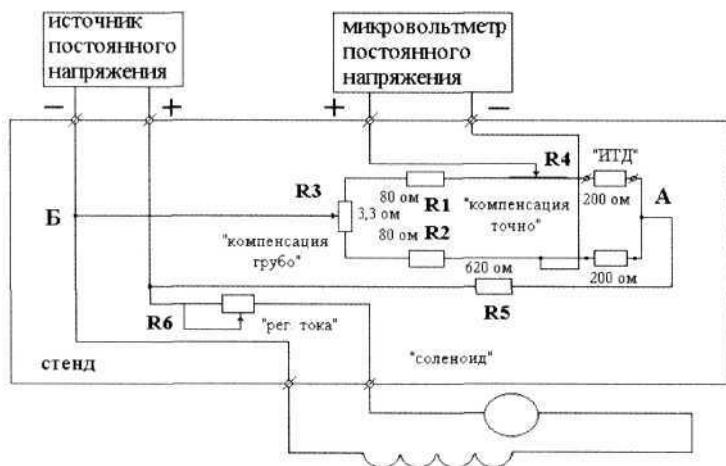


Рис. 4.9.2. Электрическая схема установки для измерения магнитострикции

два мешающих фактора существенно превосходят измеряемую величину. Основные способы отстройки от мешающих факторов использованные в стенде:

- размещение контактов индуцирующих термоЭДС в соседних плечах моста для компенсации ее;

- использование скользящего контакта реохода (контакта с большим переходным сопротивлением) в высокоомной потенциометрической цепи;

- обеспечение стабильного температурного режима за счет изготовления соленоида с большим запасом по мощности (во избежание его нагрева) и удаление его от измерительной схемы.

## Литература

1. *Вонсовский С.В.* Магнетизм: "Наука", 1971,
2. *Ивановский В.И.* Физика магнитных явлений, Издательство Московского университета, 1981
3. *Г.Рейнбот.* Магнитные материалы и их применение. Перевод с немецкого Л. Энергия, 1974, с. 375-380.

### 4.10. Методы расчета деталей постоянных магнитов

Постоянный магнит оказал огромное влияние на всю историю человечества. В первую очередь это касается магнитного компаса , остающегося и поныне надежным средством морской и воздушной навигации. Во- вторых, постоянный магнит стал одним из главных факторов, повлиявших на исследования электродинамических процессов и приведших в итоге к созданию электродинамики как науки, и всей электродинамической техники. Однако, до последнего времени практическое применение постоянных магнитов в области техники ограничивалось в основном следующими отдельными, хотя и весьма важными, применениями:

- радиотелефон
- динамический громкоговоритель
- микроэлектродвигатель
- системы возбуждения небольших электрогенераторов
- поляризованные реле
- измерительные приборы
- научные приборы и устройства
- маломощные держатели ( магнитные защелки, ловители, сепараторы и т.п.)
- медицинские приборы

Следует отметить, что все эти применения характеризуются, как правило, небольшими мощностями, усилиями и моментами. Везде, где нужно было

увеличивать их значения, конструкторская мысль обращалась к использованию электромагнитов ( соленоидов), распространившихся в технике куда более широко, но имеющих и свои ограничения и недостатки или, точнее, особенности.

Однако, за последние 30 лет свойства постоянных магнитов *революционным образом* изменились, что хорошо видно из следующей диаграммы.

Поэтому представляется, что конструктор, механик или технолог любого предприятия, в том числе и мебельного или деревообрабатывающего, должны об этом знать, как об одном из важных направлений развития современной техники.

Нижняя голубая линия показывает динамику развития свойств ферритовых магнитов, именно тех, которые мы используем в защелках. Следующая красная — магнитные сплавы типа Альнико ( алюминиево-никелевые), применяемые обычно в радио и телевизионной аппаратуре. А вот зеленая и фиолетовая — соответствуют новому виду магнитов, изготавливаемых на основе редкоземельных элементов:

- зеленая линия — Самарий-кобальтовые магниты,
- фиолетовая линия — Неодим-железо-боровые.

Как видно из диаграммы магнитная энергия самариевых магнитов в 6 раз выше, а неодимовых в 10 раз выше, чем у привычных нам ферритовых (керамических) изделий.

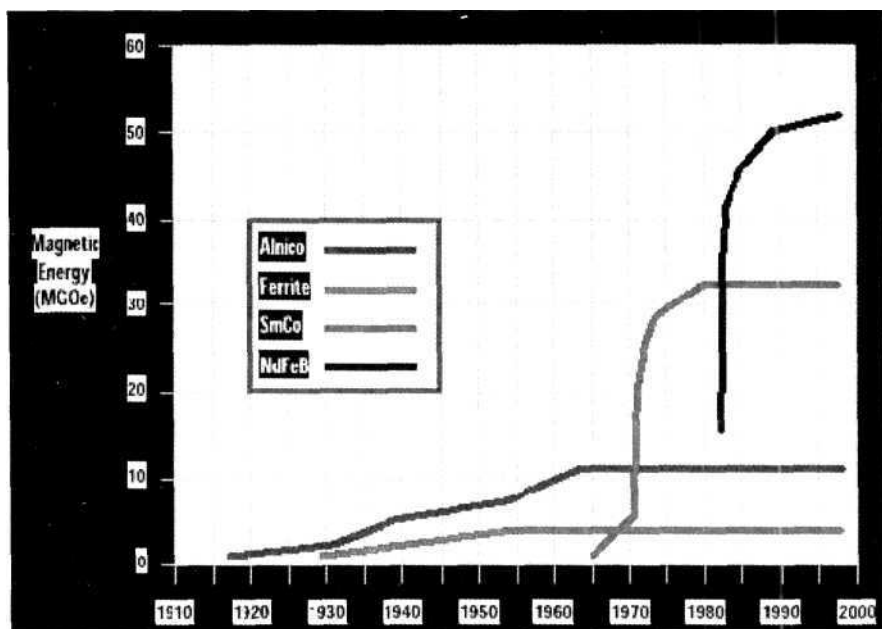
На практике это означает, что неодимовый магнетик, размером с небольшое куриное яйцо, неосторожно взятый в руки, способен раздробить пальцы. Т.е. механические усилия , которые могут создаваться постоянными магнитами уже не являются силами игрушечными или приборными, а вполне соответствуют усилиям, характерным для обычных машин и механизмов, т.е — десятки и сотни килограмм.

Такие свойства делают возможным, например, изготовление различных малогабаритных механических и электромеханических удерживающих устройств с высоким усилием фиксации, например станочных приспособлений, грузоподъемных устройств и т.п. Естественно, что опыта использования мощных магнитов в нашей обычной техники пока нет, исключая может быть магнитные сепараторы для древесной стружки на заводах ДСП. В основном, эти знания, как и раньше, остаются достоянием достаточно узкого круга специалистов — электромехаников.

Как мы знаем из закона Ампера (в простой скалярной форме  $F = I \times L \times B$ ), на проводник с током, помещенный в магнитное поле действует сила  $F$ , пропорциональная длине проводника  $L$ , силе тока /и величине магнитной индукции  $B$ .

Поэтому, электромеханические устройства (электрические двигатели, реле и т.п. приводные и др. элементы техники), основанные на явлении электромагнитной индукции, в которых применены магниты нового типа при сохранении своих размеров становятся значительно сильнее. Т.е. пропорцио-





нально увеличению величины магнитной индукции возрастает крутящий момент или тяговое усилие или скорость движения (вращения). Или же, при сохранении мощности устройства (станка) соответственно уменьшаются его габариты и вес.

Примечание. Важно понимать, что цена машины, станка или др. устройства прямо связано с его материалоемкостью. Во многих случаях эта зависимость — едва ли не прямая пропорция, что, впрочем, и понятно.

В некоторых случаях, применение мощных магнитов позволяет существенно снизить расход электроэнергии и это не противоречит законам физики.

На настоящий момент важно то, что производство магнитов на основе редкоземельных элементов давно миновало лабораторную стадию и в последние годы развивается быстрыми темпами по достаточно гибким технологиям, в том числе и в нашей стране, и они доступны любому заказчику. Хотя они и называются редкоземельными, но фактически, природные ресурсы (руды) в нашей стране для их производства весьма велики.

По данным ООО "Химкомплект" — постоянные магниты  $NdFeB$ , из известных в настоящее время систем, занимают уникальное положение по соотношению характеристики/стоимость, что объясняет бурный рост их производства и внедрение в различные отрасли. Так, в 1989г. было произведено 190, в 1999г. 13500, а 2000г.-17500 тонн металлокерамических магнитов и магнитопластов. По прогнозам аналитиков к 2005г. будет произведено около 40000 тонн магнитов  $NdFeB$ .

Где  $BH_{max}$  — энергетическое произведение  $Br$  — остаточная индукция, т.е. основная силовая характеристика постоянного магнита

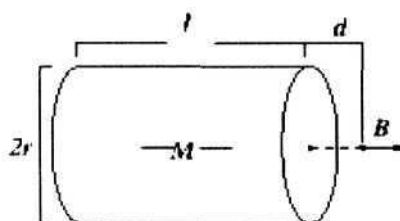
Ниже приведены методы и формулы для приблизительного расчета несложных магнитных систем на основе постоянных магнитов, рекомендуемые английской фирмой Dexter.

Почему в расчетах использованы рекомендации Dexter?

Во-первых, мне не удалось найти ничего столь же доступного для человека окончательно забывшего математику в интернете на русском языке.

Вторая причина та, что эта фирма является одним из европейских лидеров в производстве постоянных магнитов и поэтому, наверное, заслуживает внимания. Все последующие формулы, комментарии и картинки (черный шрифт "Times" ) взяты непосредственно со страницы этой фирмы.

Расчет магнитной индукции аксиально-намагниченных цилиндрических магнитов с радиусом ( $r$ ) и длиной ( $l$ ), в точке расположенной на расстоянии ( $d$ ) от поверхности, вдоль оси:



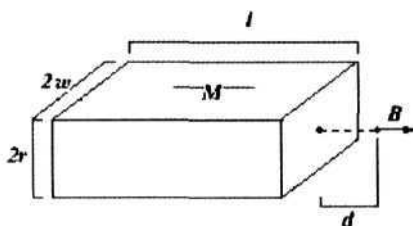
$$B = \frac{B_r}{2} \left[ \frac{d+l}{\sqrt{(d+l)^2 + r^2}} - \frac{d}{\sqrt{d^2 + r^2}} \right]$$

Пример:

$r=0.5"$ ,  $l=1"$ ,  $d=0.25"$ ,  $B_r=12200$  Gauss,  $B=2935.7$  Gauss

Расчет методом граничных элементов (МГЭ),  $B=2788.7$  Gauss

Расчет магнитной индукции для призматических магнитов намагниченных по длине, толщиной ( $2t$ ), шириной ( $2w$ ) и длиной ( $l$ ), для точки расположенной на расстоянии ( $d$ ) от поверхности вдоль магнитной оси:



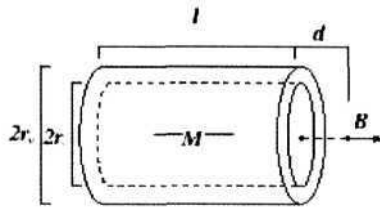
$$B = \frac{B_r}{\pi} \left[ \tan^{-1} \left( \frac{d+l}{tw} \sqrt{t^2 + w^2 (d+l)^2} \right) - \tan^{-1} \left( \frac{d}{tw} \sqrt{t^2 + w^2 + d^2} \right) \right]$$

Пример:

$2t=1''$ ,  $2w=1''$ ,  $l=0.5''$ ,  $d=0.25''$ ,  $B_r=12200$ ,  $B=2386.5$  Gauss. Используя МГЭ,  $B=2238$  Gauss

Расчет магнитной индукции в точке вдоль осей этих геометрий более комплексный. Есть три компонента магнитной индукции, которые должны быть приняты во внимание, но принцип остается тем же. Подобные формулы приемлемы для прямоугольных магнитов. Цилиндрические магниты труднее поддаются расчету, для них рекомендуются компьютерные методы расчета.

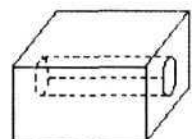
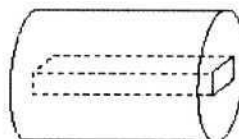
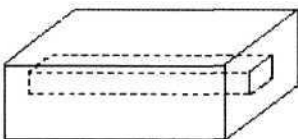
При использовании принципа совмещения, могут быть подвергнуты анализу магниты и более сложных геометрических форм. Для примера, мы можем рассчитать магнитную индукцию вдоль оси цилиндрической трубы.



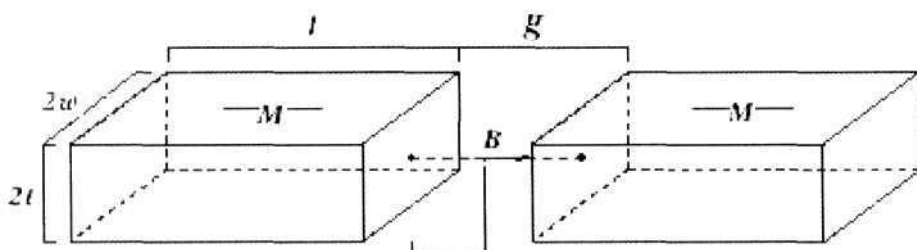
$$B = \frac{B_r}{2} \left[ \frac{d+l}{\sqrt{(d+l)^2 + r_0^2}} - \frac{d}{\sqrt{d^2 + r_0^2}} - \left( \frac{d+l}{\sqrt{(d+l)^2 + r_i^2}} - \frac{d}{\sqrt{d^2 + r_i^2}} \right) \right]$$

Вычитая магнитную индукцию внутреннего цилиндра с диаметром ( $2r_i$ ) из магнитной индукции цилиндра с внешним диаметром ( $2r_0$ ), мы получаем магнитную индукцию трубы (которая обычно используется в Фарадеевых поворотных устройствах).

Подобная логика может быть приложима и к другим магнитам симметричной формы:



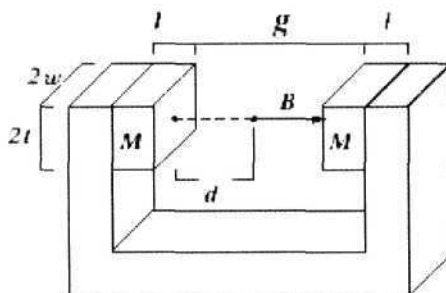
Используя принцип суперпозиции, можно определить магнитную индукцию в промежутке между двумя соосно расположенными магнитами:



Индукция между двумя призмами на расстоянии ( $d$ ) определяется по формуле  $B = B_1 + B_2$ , где  $B_2$  — индукция от призмы на расстоянии ( $g-d$ ).

Приближенно, результаты таких расчетов могут быть применимы к магнитам, размещенным в ненасыщенной стальной цепи. Когда используются подобные формулы, обычно исходят из предположения, что распределение индукции в стали соответствует индукции магнита двойной длины. Если большая часть магнитного потока проходит через зазор (т.е. без потерь в стали), то результат расчета имеет хорошую точность.

Для двух магнитов размещенных на С-образной скобе:



$B = B_1 + B_2$ , где  $B_1$  — индукция прямоугольного блока длиной ( $2l$ ) на расстоянии ( $d$ ).  $B_2$  — индукция прямоугольного блока длиной ( $2l$ ) на расстоянии ( $g-d$ ).

Пример:  $l=1"$ ,  $2w=1"$ ,  $2t=1"$ ,  $B_r=12200$  Gauss,  $g=1"$ ,  $d=0.3"$ ,  $B_1=3033$  Gauss,  $B_2=1210$  Gauss,  $B_1 + B_2=4243$  Gauss, используя МГЭ,  $B=4121$  Gauss.

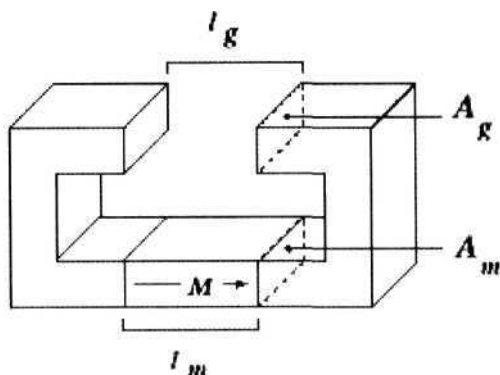
Дальнейшие вариации на эту тему бесконечны. Для большей точности рекомендуются компьютерные расчеты

### Расчет цепей

Эмпирический подход пригоден для анализа цепи со стальным сердечником или другими проницаемыми материалами. Начиная с идеальной цепи не имеющей потерь и сопротивления в стали, этот метод используется для эмпирического определения отношений в точных моделях магнитных цепей.

Рисунок идеальной цепи см. ниже

Используя закон Ампера для цепи, допускаем, что в стали отсутствуют потери магнитодвижущей силы:



$$H_m l_m = H_g l_g,$$

где  $H_m = MMF$  магнита,  $l_m$  — длина магнита,  $H_g = MMF$  поперек зазора,  $l_g$  — длина зазора.

Допуская, что весь поток индукции проходит полностью через зазор (т.е. без потерь) мы можем написать следующее соотношение:

$$B_m A_m = B_g A_g,$$

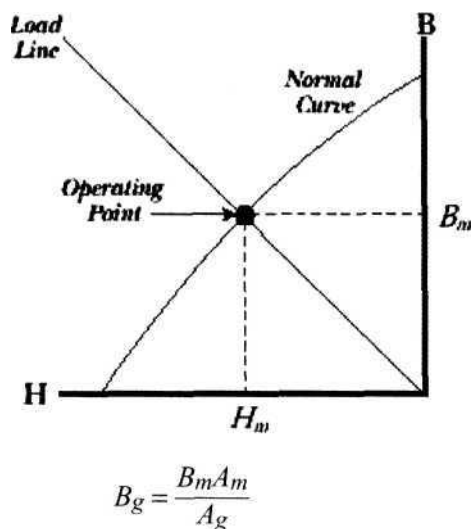
где  $B_m$  — индукция магнита,  $A_m$  — поперечное сечение магнита,  $B_g$  — поток через зазор,  $A_g$  — поперечное сечение зазора. Если мы допустим  $B_m$  и  $H_m$  и возьмем их соотношение, то мы получим коэффициент проницаемости (PC).

$$\frac{B_m}{H_m} = \frac{B_g A_g l_m}{H_g A_m l_g}$$

Проницаемость материала определяется как  $\mu = B/H$ . В системе CGS проницаемость воздуха равна единице, таким образом  $B_g = H_g$ . Тогда соотношение для коэффициента проницаемости:

$$\frac{B_m}{H_m} = \frac{A_g l_m}{A_m l_g}$$

Коэффициент проницаемости определяется на наклонной линии к началу координат. Пересечение наклонной линии и второго квадранта кривой размагничивания называется операционной точкой, где  $B$  и  $H_m$  геометрически определены. От  $B_m$ , мы можем рассчитать индукцию в зазоре, ( $B_g$ ):



Этот подсчет является приблизительным, потому что не учитывает потерь индукции или MMF в цепи. Фактор потерь ( $y$ ) и фактор сопротивления ( $f$ ) определяются эмпирически в соответствии с упомянутыми выше отношениями (для большей точности).

$$H_m l_m = f H_g l_g \quad B_m A_m = y B_g A_g \frac{B_m}{H_m} = \frac{O A_g l_m}{f A_m l_g}$$

Фактор потерь есть соотношение общего магнитного потока к потоку в зазоре. Он определяется проницаемостью, и аналогичен проводимости электрической цепи. A magnetic circuit can usually be broken up into basic leakage paths. Для каждой потерьанной магнитной линии эмпирически определяется формула для магнитной проводимости, которая может быть использована. Обычно используются формулы из книги ("Electromagnetic Devices" (Электромагнитные устройства) написанной Herbert C. Roters (New York: John Wiley & Sons, Inc., 1941).

Фактор потерь:

$$y = \frac{P_t}{P_g}$$

где  $P_t$  — сумма проницаемости всех потерьанных магнитных линий (включая зазор) цепи,  $P_g$  — проницаемость зазора.

Фактор сопротивления ( $f$ ) считается для потерь MMF в несущих магнитный поток элементах цепи (т.е. стали) и небольших зазорах между деталями. Этот фактор определяется эмпирически и находится в пределах от 1,1 до 1,5 для большинства цепей. Большие значения относятся к цепям близким к уровню насыщению стали. Фактор сопротивления:

$$f = \frac{H_t}{H_g}$$

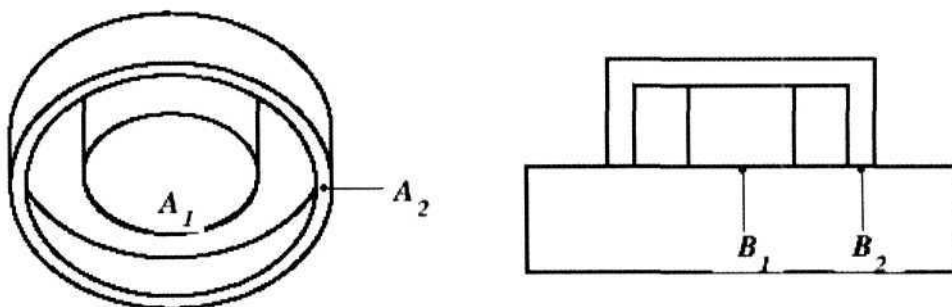
Где  $H_t$  — суммарная  $MMF$  и  $H_g$  —  $MMF$  поперек зазора.

### Расчет сил

Обычно используется следующая формула для расчета удерживающей силы магнита:

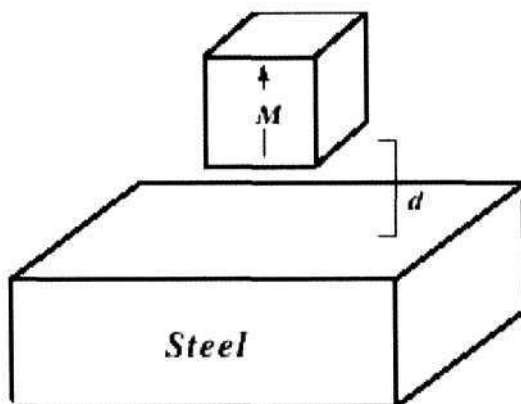
$$F = 0.577 B^2 A$$

$$F = 0.577 (B_1^2 A_1 + B_2^2 A_2)$$



Для простых магнитов отделенных от стальной пластины воздушным промежутком ( $d$ ), с хорошей точностью для  $B$  может быть рассчитано через текущие соотношения.

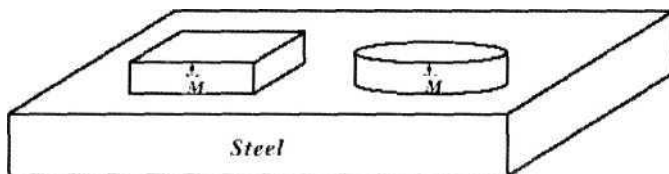
Для магнита непосредственно соприкасающегося со сталью, могут быть использованы следующие два метода.



Если магнит имеет форму подобную диску или пластинке (малое отношение длина/диаметр) , используется следующая формула:

$$F = 0.577 B_r^2 l_m \sqrt{A}$$

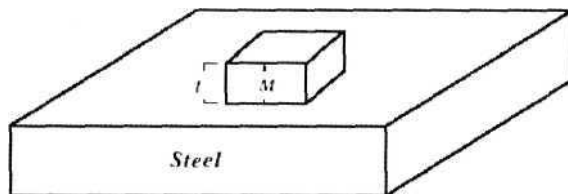
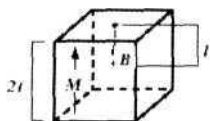
где  $B_r$  = остаточная индукция,  $l_m$  = длина магнита и  $A$  = площадь полюса.



Для магнитов имеющих кубическую или призматическую форму или для тех, у которых соотношение длины к диаметру равно 1 или более, результат может быть получен с хорошей точностью. Допуская, что индукция в стали приблизительно эквивалентна индукции магнита двойной длины, мы можем вычислить магнитную индукцию в центре используя следующее уравнение:

Calculate  $B@d=1$

$$F = 0.577 B^2 A$$



Примечание . Кажется, что облегчить эти расчеты можно используя, например, стандартные способы из программы " Excel" пакета "Windows" или несколько специальных магнитных калькуляторов, расположенных на сайте фирмы "Dexter".

Представляется что, сайт фирмы "Dexter" является вообще неплохим примером построения сайта промышленного предприятия, так как содержит не только подробное описание продукции и услуг, но и много др. информации полезной для потребителя.

Неплохо было бы и нашим мебельщикам давать на своих страничках дополнительную информацию, например советы по сборке и установке мебели, уходу за обивкой и полированными поверхностями и , расстановке мебели в помещении и т.п. - - полезную и интересную покупателям. Т.е. не только продавец, но и друг и помощник.

Для самостоятельного анализа и расчета магнитных систем можно рекомендовать так же очень интересный отечественный комплекс программ для



инженерного моделирования электромагнитных, тепловых и механических задач методом конечных элементов ELCUT". Дружественный пользовательский интерфейс, простота описания даже самых сложных моделей, широкие аналитические возможности комплекса и высокая степень автоматизации всех операций позволяют разработчику полностью сосредоточиться на своей задаче не отвлекаясь на изучение математических основ вычислительных алгоритмов и особенностей их реализации. Ознакомиться с возможностями комплекса, пройти обучение и получить бесплатно демоверсию программы можно непосредственно на сервере ELCUT.

Для начала освоения программы требуется всего несколько часов. Важным достоинством данной программы является то, что выдаваемая цветная графика очень удобна для понимания существа, т.е физики процесса.

По вопросам производства и применения современных постоянных магнитов в сети имеется значительное количество источников на русском и иностранном языках.

Дополнительная литература

1. Перспективные материалы для постоянных магнитов

А.С. Мищенко и А.М. Тишин >>>

2. Информационные ресурсы Магнитного технологического центра группы "Arnold" >>> в том числе "Перечень научно-технической литературы по магнитной тематике", "Алфавитный перечень фирм, связанных с производством магнитов" и много др. полезной информации

#### **4.11. Методика расчёта магнитного поля и вихревых токов в проводящих средах при изменении тока в соленоиде**

В общем случае переменного электромагнитного поля расчёты напряжённости магнитного и вихревого электрического полей в вакууме проводятся на основе уравнений Максвелла в дифференциальной форме (в системе СИ) [1]:

$$\operatorname{div} D = \rho, \quad (1)$$

$$\operatorname{div} B = 0, \quad (2)$$

$$\frac{\partial D}{\partial t} + j = \operatorname{rot} H, \quad (3)$$

$$-\frac{\partial B}{\partial t} + j = \operatorname{rot} E. \quad (4)$$

Здесь  $D$ ,  $B$ ,  $H$ ,  $E$ ,  $j$  и  $\rho$  — это векторные поля электрического смещения, магнитной индукции, напряжённости магнитного поля, напряжённости электрического поля, плотности электрического тока и скалярное поле плотности электрического заряда, соответственно. Пользуясь этими уравнениями можно рассчитать величины напряжённости  $H$  для магнитных и  $E$  для электрических полей для произвольных плотностей токов  $j$  в обмотках электромагнита и в

любой точке пространства. В произвольной среде величины магнитной индукции  $B$  и электрического смещения  $D$  связаны с напряжённостью магнитного поля  $H$  и с напряжённостью электрического поля  $E$  соотношениями:

$$B = \mu\mu_0 H, \quad D = \epsilon\epsilon_0 E, \quad (5)$$

где  $\mu$  и  $\mu_0$  — это магнитная проницаемость среды и вакуума, а  $\epsilon$  и  $\epsilon_0$  — это диэлектрическая проницаемость среды и вакуума, соответственно.

В дальнейшем эти величины будут использованы для вычисления плотности вихревых токов в проводящей среде, применяя закон Ома:

$$J = \lambda E, \quad (6)$$

где  $\lambda$  — удельная электропроводность вещества (в СИ — в единицах 1/Ом·м).

В работе источником магнитного поля служили катушки с ферритовым сердечником. В статике и при низкой частоте колебаний (меньше 1 кГц) учитывали то обстоятельство, что длина электромагнитной волны и глубина скин-слоя в случае слабо проводящей среды много больше размеров катушки. Тогда, в первом приближении можно пренебречь излучением электромагнитной волны и скин-эффектом, и оценить величину магнитного поля такой катушки с помощью простых формул магнитостатики, известных из стандартного курса электромагнетизма [1]. Так, например, внутри бесконечно длинного (т.е. очень тонкого по сравнению с характерными размерами задачи) соленоида напряжённость  $H$  магнитного поля равна произведению:

$$H = nI, \quad (7)$$

где  $n$  — число витков на единицу длины (в метрах),  $I$  — электрический ток (в амперах), а  $H$  получается в единицах ампер/метр (в вакууме 1 А/м =  $(4\pi/10^3)$  эрстед). Чтобы получить величины магнитной индукции  $B$  в вакууме в единицах тесла, нужно умножить  $H$  на  $\mu_0$ , так что  $B = H\mu_0 = H(4\pi/10^7)$  тесла. Таким образом, напряжённости магнитного поля  $H$  в 1 эрстед в вакууме соответствует магнитная индукция  $B$  величиной  $10^{-4}$  тесла.

Для величины напряжённости магнитного поля вдоль оси соленоида конечных размеров формула (7) принимает вид:

$$H = nI(\cos\beta + \cos\alpha)/2, \quad (8)$$

где  $\beta$  и  $\alpha$  — это величины углов (в радианах), под которыми видны края соленоида из точки наблюдения:

$$\begin{aligned} \cos\alpha &= (h - z)/(a^2 + (h - z)^2)^{1/2}, \\ \cos\beta &= z/(a^2 + z^2)^{1/2}, \end{aligned} \quad (9)$$

где  $h$  — это длина катушки в метрах,  $a$  — ее радиус,  $z$  — координата точки наблюдения на оси соленоида, начиная с нижнего края катушки.

Все расчеты величин магнитных и электрических полей и вихревых токов, а также картины пространственного распределения их векторных полей, проводились на компьютере в рамках прикладного пакета программ "МАТЕМАТИКА 4", совместимого с операционной системой Windows98 и выше. Этот программный продукт позволяет проводить расчеты непосредственно по формулам математической физики, в том числе решать интегро-дифференциальные уравнения, а также приводить результаты в удобном графическом виде.

В качестве конкретного примера рассчитаем зависимость величины магнитной индукции  $B(z)$  в единицах тесла от расстояния  $z$  в сантиметрах по оси соленоида до нижнего края цилиндрической катушки. Ее параметры: радиус  $a=2$  см, длина  $h=10$  см, плотность витков  $n=100/h$ , ток  $I=0.2$  ампера, магнитный сердечник с магнитной проницаемостью  $\mu=700$ . Ниже приведена соответствующая расчетная формула задачи в том виде, как она непосредственно задается для компьютерного счета:

$$B = 700nJ \cdot 4\pi / 100000000 (h - z) / ((h - z)^2 + a^2)^{1/2} + \frac{z}{(z^2 + a^2)^{1/2}} / 2 \tag{10}$$

Результаты расчета удобно представить в виде графика (рис. 4.11.1):

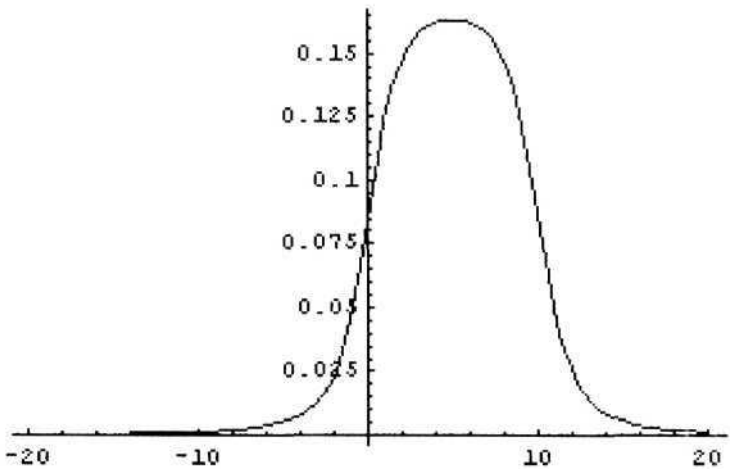


Рис. 4.11.1 Ось ординат — расчетная магнитная индукция  $B$  в теслах по оси катушки, ось абсцисс  $z$  — расстояние в сантиметрах от ее нижнего края.

Параметры катушки: радиус  $a=2$  см, длина  $h=10$  см, плотность витков  $n=100/h$ , ток  $I=0.2$  ампера, магнитный сердечник из феррита марки М700НН с магнитной проницаемостью  $\mu=700$

Из Рис.4.11.1. видно, что величина магнитной индукции  $B$  достигает максимума  $B=0.17$  Тл в центре катушки и плавно спадает при удалении от него. Так, у нижнего края катушки ( $z=0$ ) она уже в два раза меньше и составляет  $B=0.085$  Тл, а на расстоянии 2 см ниже ее края ( $z=-2$  см) индукция равна  $B=0.025$  Тл = 25 мТл. Предполагается, что ферритовый сердечник заполняет пространство только внутри катушки, что, однако, практически не влияет на величину магнитной индукции внутри расположенной рядом с катушкой биологической ткани, которая имеет магнитную проницаемость  $\mu \sim 1$ .

Если же форма катушки отличается от цилиндрической и/или необходимо определить магнитное поле не на ее оси, то расчетные формулы сильно усложняются. В таких случаях можно достаточно точно оценить соответствующие величины, используя приближенные формулы.

В качестве примера продолжим расчет магнитной индукции цилиндрической катушки с параметрами Рис.4.11.1 в области пространства вне ее оси. Для этого можно использовать разложение компонент магнитного поля вблизи оси катушки по цилиндрическим координатам  $z$  и  $r$ :

$$\begin{aligned} H_z &= H(z) - \left(\frac{r}{2}\right)^2 H''(z) + \left(\frac{r}{2}\right)^4 \frac{H''''(z)}{2} - \dots \\ H_r &= -\frac{r}{2} H'(z) + \left(\frac{r}{2}\right)^3 \frac{H'''(z)}{2} - \dots \\ H_\theta &= 0 \end{aligned} \quad (11)$$

С учетом выражений (8, 9) для магнитной индукции через параметры катушки (соответствующий набор формул, вводимых для начала счета в рамках пакета "МАТЕМАТИКА 4", хотя и прост, но слишком громоздок для выписывания) получаем следующие формулы для расчета ее цилиндрических компонент.

Для продольной компоненты  $B_z$  имеем:

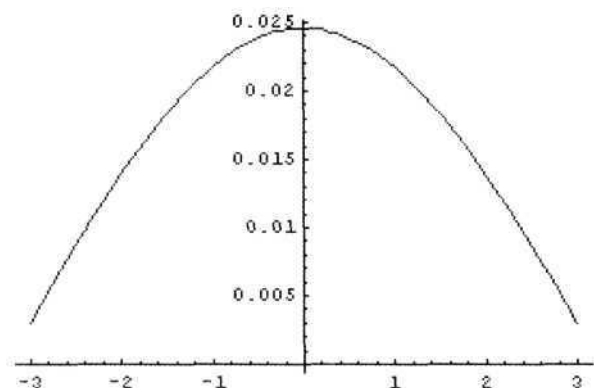


Рис.4.11.2. Расчетный график зависимости радиальной компоненты магнитной индукции  $Br$  в Тл от расстояния  $r$  в см до оси катушки с параметрами из Рис. 1. при  $z=-2$  см

и для радиальной компоненты  $B_r$ :

$$0.00274889r^3$$

$$\left( \frac{3}{(4 + (10 - z)^2)^{3/2}} - \frac{18(10 - z)^2}{(4 + (10 - z)^2)^{5/2}} + \frac{15(10 - z)^2}{(4 + (10 - z)^2)^{7/2}} - \frac{15z^4}{(4 + z^2)^{7/2}} + \frac{18z^4}{(4 + z^2)^{5/2}} - \frac{3}{(4 + z^2)^{3/2}} \right) - 0.0439823r \left( \frac{3}{\sqrt{4 + (10 - z)^2}} + \frac{(10 - z)^2}{(4 - (10 - z)^2)^{3/2}} - \frac{z^2}{(4 + z^2)^{3/2}} + \frac{1}{\sqrt{4 + z^2}} \right)$$

Перейдем теперь к расчетам вихревых электрических полей в среде с проводимостью  $X$ . При изменении во времени магнитной индукции  $B(x, y, z, t)$  в области, окружающей соленоид, возникают вихревые электрические поля  $E(x, y, z, t)$ , такие, что согласно уравнению Максвелла (4):

$$\text{rot} E(x, y, z, t) = \partial B(x, y, z, t) / \partial t. \quad (12)$$

Эти вихревые электрические поля вызывают соответствующие вихревые токи в проводящей среде, где происходит изменение магнитной индукции  $B(x, y, z, t)$ .

При достаточно низкой частоте таких изменений тока  $I(t)$  в катушке соленоида из уравнения Максвелла (3) можно с хорошей степенью точности записать:

$$\partial B(x, y, z, t) / \partial t = (B_0(x, y, z, t) / I_0) (\partial I(t) / \partial t), \quad (13)$$

где  $B_0(x, y, z)$  — это магнитная индукция, создаваемая в пространстве вблизи соленоида с постоянным током  $I_0$ . Учитывая, что магнитная индукция может быть представлена как ротор векторного потенциала  $A(x, y, z, t)$  [2]:

$$B = \text{rot} A(x, y, z, t), \text{ где } A(x, y, z, t) = \int J(x, y, z, t) dx dy dz / |r - r(x, y, z, t)|.$$

Из (10) и (11) получаем пропорциональность вихревого электрического поля  $E(x, y, z, t)$  векторному потенциалу  $A(x, y, z, t)$ . Поэтому, для вычисления вихревых токов полезно провести расчет векторных полей  $B(x, y, z, t)$  и  $A(x, y, z, t)$  для какого-нибудь постоянного тока  $I_0$ , а потом этот расчёт использовать в задаче с переменными токами низкой частоты  $I(t)$ . Этому расчёту посвящено нижеследующее рассмотрение.

В качестве начального приближения следует провести рассмотрение для очень тонкого и длинного соленоида, так как по ряду причин оно оказывается полезным и находит своё применение в качестве структурного элемента в

более сложных расчетах для соленоидов с большим отношением диаметра к длине. Наличие магнитного сердечника на оси соленоида приводит лишь к пропорциональному увеличению магнитной индукции  $B(x,y,z,l)$  во всех точках пространства и не искажает картины силовых линий, полученной в рамках рассмотрения простых соленоидов без сердечника.

Для бесконечно тонкого соленоида магнитная индукция в окружающем пространстве выглядит как суперпозиция радиальных кулоновских полей от двух разноимённых магнитных полюсов, расположенных в концевых точках этого тонкого соленоида. Ниже показан пример применения этого подхода к расчету величин магнитной индукции и полей векторного потенциала в пространстве вокруг тонкого соленоида. Соответствующий набор формул для пакета "МАТЕМАТИКА 4" имеет следующий вид:

$$\begin{aligned}
 X &:= x \cos(\alpha) + z \sin(\alpha) ; Y := y ; Z := z \cos(\alpha) - x \sin(\alpha) ; \\
 B_y &:= +BY ; B_x := -\frac{BX \cos(\alpha) + BZ \sin(\alpha)}{\cos(\alpha)^2 + \sin(\alpha)^2} ; \\
 B_z &:= -\frac{-BZ \cos(\alpha) - BX \sin(\alpha)}{\cos(\alpha)^2 + \sin(\alpha)^2} ; A_y := +AY ; \\
 A_x &:= -\frac{-AX \cos(\alpha) + AZ \sin(\alpha)}{\cos(\alpha)^2 + \sin(\alpha)^2} ; A_z := \frac{-AZ \cos(\alpha) - AX \sin(\alpha)}{\cos(\alpha)^2 + \sin(\alpha)^2} ; \\
 BX &:= \frac{X}{(X^2 + Y^2 + (Z+a)^2)^{3/2}} - \frac{X}{(X^2 + Y^2 + Z^2)^{3/2}} ; \\
 BY &:= \frac{Y}{(X^2 + Y^2 + (Z+a)^2)^{3/2}} - \frac{Y}{(X^2 + Y^2 + Z^2)^{3/2}} ; \\
 BZ &:= \frac{Z+a}{(X^2 + Y^2 + (Z+a)^2)^{3/2}} - \frac{Z}{(X^2 + Y^2 + Z^2)^{3/2}} ; \\
 AX &:= \frac{Y(1 - \frac{Z+a}{\sqrt{X^2 + Y^2 + (Z+a)^2}})}{X^2 + Y^2} - \frac{Y(1 - \frac{Z}{\sqrt{X^2 + Y^2 + Z^2}})}{X^2 + Y^2} ; \\
 AY &:= \frac{X(1 - \frac{Z+a}{\sqrt{X^2 + Y^2 + (Z+a)^2}})}{X^2 + Y^2} + \frac{X(1 - \frac{Z}{\sqrt{X^2 + Y^2 + Z^2}})}{X^2 + Y^2} ; AZ := 0 ; \\
 A &:= ((AX)^2 + (AY)^2)^{(1/2)} ; r := ((X)^2 + (Y)^2)^{(1/2)} ; \\
 F &:= A_r ; a := -10
 \end{aligned}$$

В приведённом примере  $(X,Y,Z)$  -- это система координат, в которой соленоид расположен вертикально по оси  $Z$ , а  $(x,y,z)$  — это система координат, в которой проводящие слои расположены горизонтально, т.е. перпендикулярно оси  $z$ . Первые уравнения описывают преобразования компонент векторов магнитной индукции, радиус-вектора и векторного потенциала при повороте

системы координат относительно оси  $y$  на некоторый угол от нуля до 90 градусов. Величины  $AX, AY, AZ$  — это компоненты векторного потенциала, а  $BX, BY, BZ$  — компоненты вектора магнитной индукции в той системе координат, где соленоид зафиксирован вертикально. Величины  $A_x, A_y, A_z$  и  $B_x, B_y, B_z$  — это компоненты векторного потенциала и компоненты вектора магнитной индукции, соответственно, в той системе координат, где поверхность проводящей среды горизонтальна. Величина параметра  $a=10$  соответствует расстоянию в см между краями соленоида.

По теореме Стокса [2] циркуляция вектора  $A$  по аксиально-симметричной окружности вокруг оси соленоида равна величине потока магнитной индукции от конца соленоида через поверхность, ограниченную этой окружностью. Поэтому формулы для векторного потенциала легко получаются из кулоновского закона обратных квадратов для магнитного поля от конца длинного, тонкого, вертикального соленоида. Это же обстоятельство упрощает метод получения картины силовых линий магнитного поля в случае аксиальной симметрии магнитного поля, который тогда сводится к построению линий уровня для вспомогательной функции  $F(r)=A(r)r$ .

Действительно, для фигуры вращения, полученной при повороте силовой линии магнитной индукции относительно оси соленоида, выполняется условие постоянства магнитного потока через произвольное сечение. Для простейшего случая, когда тонкий соленоид ориентирован перпендикулярно поверхности проводящих слоёв и угол наклона, следовательно, равен нулю, картина силовых линий магнитной индукции имеет следующий вид:

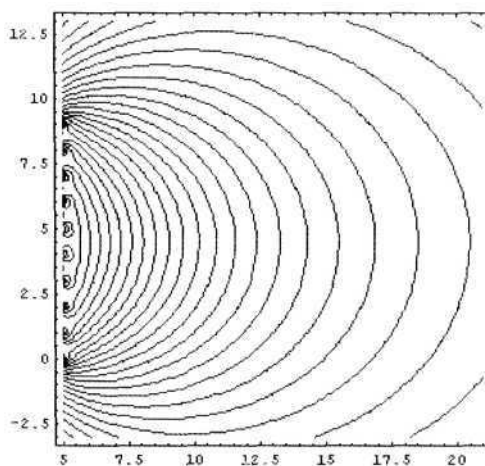


Рис.4.11.3. Картина силовых линий магнитной индукции вокруг тонкого соленоида, расположенного вертикально с нижним краем в начале координат. Расстояния по осям даны в см. Области сгущения силовых линий соответствуют концам соленоида

Здесь  $a=10$  условных единиц (например, см), а поверхность проводящих слоев предполагается горизонтальной и проходящей через отметку 0 по высоте; по горизонтали отложено расстояние от оси симметрии в тех же единицах (см).

Для получения картины распределения вихревых токов в проводящих слоях биологических объектов удобно воспользоваться опцией Unit Step в пакете "МАТЕМАТИКА 4", которая позволяет задавать произвольную многоступенчатую функцию, как сумму отдельных прямоугольных ступенек с заданными амплитудами и ширинами, которые соответствуют величинам проводимости и толщине проводящих биологических тканей, как например, на Рис.4.11.4.:

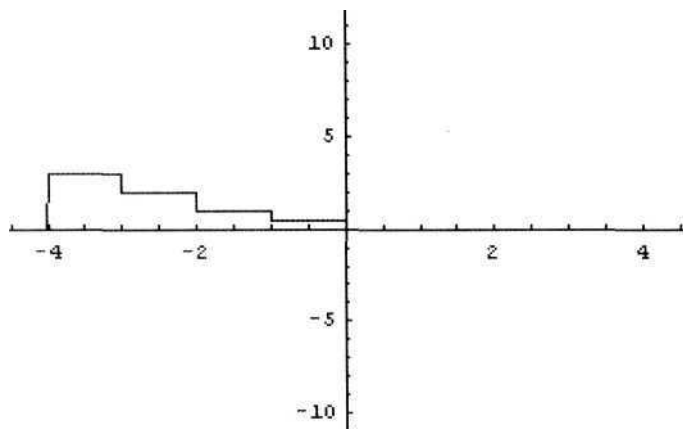
$$\text{Plot}[\text{UnitStep}[-(z+1)(z+2)] + 2\text{UnitStep}[-(z+2)(z+3)] + \\ + 3\text{UnitStep}[-(z+3)(z+4)] + 0.4\text{UnitStep}[-(z+1)(z)], \\ \{z, -5, 5\}, \text{PlotRange} \rightarrow \{-13, 13\}]$$


Рис.4.11.4. Здесь представлена в качестве иллюстрации модель проводящих слоёв толщиной по 1 см с проводимостями 0.4, 1, 2 и 3 1/Ом м, соответственно, для первых четырёх плоских слоев, считая от поверхности вглубь проводящей среды. Ось абсцисс соответствует направлению оси соленоида

Ниже приведен расчетный график радиального распределения вихревых токов индукции в такой модели проводящих слоёв, полученный с учётом того, что плотность вихревых токов в некоторой точке проводящей среды пропорциональна величине проводимости и величине векторного потенциала в данной точке. Более светлые участки на графике Рис.4.11.5 соответствуют большим величинам плотности вихревого тока, а более тёмные — меньшим. По вертикали  $z$  меняется от 0.1 см до 4.1 см вглубь проводящей среды. По горизонтали отложено расстояние до оси соленоида от 0 см до 4 см:



$DensityPlot[A(UnitStep[-(z + 1)(z + 2)] + 2UnitStep[-(z + 2)(z + 3)] +$   
 $+ 3UnitStep[-(z + 3)(z + 4)] + 0.4UnitStep[-(z + 1)(z)] ,$   
 $\{x,0,4\}, \{z,-4.1,-0.1\} PlotPoints \rightarrow 25];$

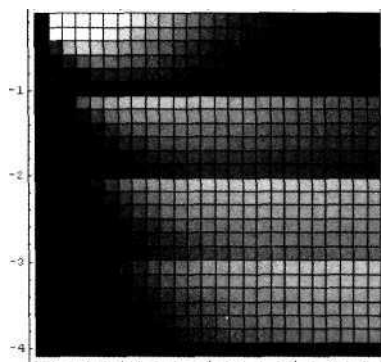


Рис.4.11.5. Карта распределения амплитуды плотности вихревого тока по глубине в слоистой проводящей среде. Ось абсцисс — расстояние от оси соленоида. Расстояния по осям — в см.

На некоторой глубине, скажем,  $z=-2$ , распределение плотности тока имеет следующий вид (Из Рис.4.11.6, где изображен вид сверху на картину распределения плотностей вихревых токов, следует, что плотность вихревых токов сначала возрастает при удалении от оси соленоида, достигает максимального значения при  $r \sim a$ , а затем спадает.):

$DensityPlot[A(UnitStep[-(z + 1)(z + 2)] + 2UnitStep[-(z + 2)(z + 3)] +$   
 $+ 3UnitStep[-(z + 3)(z + 4)] + 0.4UnitStep[-(z + 1)(z)] ,$   
 $\{x,0,4\}, \{z,-4.1,-0.1\} PlotPoints \rightarrow 25];$

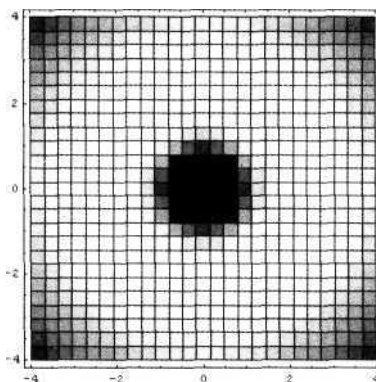


Рис.4.11.6. Радиальное распределение плотности вихревого тока, созданного переменным магнитным полем вертикально ориентированного соленоида в отдельном слое на глубине  $z=-2$  см

Если тонкий соленоид наклонён под некоторым углом к поверхности проводящей среды, то картина распределения плотностей токов несколько изменится. В этом случае надо писать вместо выражения для действующего векторного потенциала другое эффективное выражение. Например, если тонкий соленоид расположен горизонтально и параллельно оси  $x$  и поверхности среды, то вместо действующего векторного потенциала следует для определения установившихся вихревых токов писать выражение для эффективного векторного потенциала  $AX$ ,  $AY$ ,  $AZ$ . Оно получается, если учесть эффект нейтрализации поперечной к поверхности среды компоненты плотности тока из-за эффектов поляризации среды внутри проводника во внешнем, неоднородном электрическом потенциале. Кроме того, используется тот факт, что кулоновское магнитное поле от каждого конца тонкого соленоида обладает центральной симметрией и подчиняется закону обратных квадратов. Тогда набор формул для пакета программ "МАТЕМАТИКА 4" приобретает вид:

$$\begin{aligned}
 X &= x \cos(\alpha) + z \sin(\alpha) ; Y = y ; Z = z \cos(\alpha) - x \sin(\alpha) ; \\
 B_y &= +BY ; B_x = -\frac{BX \cos(\alpha) + BZ \sin(\alpha)}{\cos(\alpha)^2 + \sin(\alpha)^2} ; \\
 B_z &= -\frac{-BZ \cos(\alpha) - BX \sin(\alpha)}{\cos(\alpha)^2 + \sin(\alpha)^2} ; A_y = +AY ; \\
 A_x &= -\frac{-AX \cos(\alpha) + AZ \sin(\alpha)}{\cos(\alpha)^2 + \sin(\alpha)^2} ; A_z = \frac{-AZ \cos(\alpha) - AX \sin(\alpha)}{\cos(\alpha)^2 + \sin(\alpha)^2} ; \\
 AX &= \frac{Y(1 - \frac{Z+a}{\sqrt{(X+b)^2 + Y^2 + (Z+a)^2}})}{(X+b)^2 + Y^2} - \frac{Y(1 - \frac{Z}{\sqrt{X^2 + Y^2 + Z^2}})}{X^2 + Y^2} ; \\
 AY &= \frac{(X+b) - \frac{(X+b)(Z+a)}{\sqrt{(X+b)^2 + Y^2 + (Z+a)^2}^{right)}}{(X+b)^2 + Y^2} + \frac{X(1 - \frac{XZ}{\sqrt{X^2 + Y^2 + Z^2}})}{X^2 + Y^2} ; \\
 AZ &= 0 ; A = ((AX)^2 + (AY)^2)^{(1/2)} ; a = 0 ; b = 10 ; \\
 \alpha &= 0 ;
 \end{aligned}$$

Для таких случаев картина распределения плотности вихревого тока на глубине  $z=-2$  имеет вид:

$$\begin{aligned}
 &DensityPlot[A(UnitStep[-(z+1)(z+2)] + 2UnitStep[-(z+2)(z+3)] + \\
 &+ 3UnitStep[-(z+3)(z+4)] + 0.4UnitStep[-(z+1)(z)]) , \\
 &\{x, -14, 14\}, \{y, -14, 14\} \text{ PlotPoints} \rightarrow 25];
 \end{aligned}$$

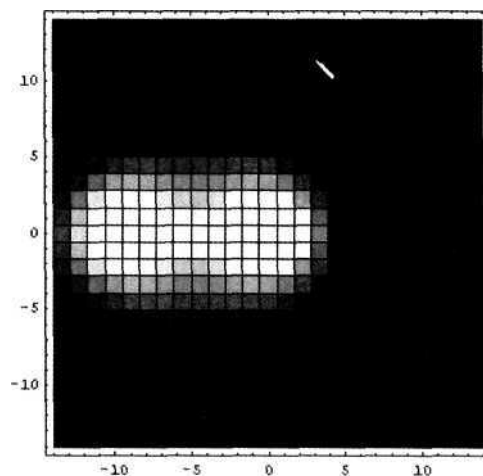


Рис.4.11.7, а. Карта распределения величины плотности вихревого тока в отдельном слое на глубине 2 см при горизонтальном расположении катушки

Из Рис.4.11.7, а видно, что верхний конец тонкого соленоида перемещается влево при положительных значениях параметра  $b$  — горизонтальной проекции соленоида на плоскость слоя, и вправо при отрицательных. Ниже дается картина векторного поля плотности вихревых токов на той же глубине, которая, в отличие от предыдущего рисунка, дает распределение направлений этих токов.

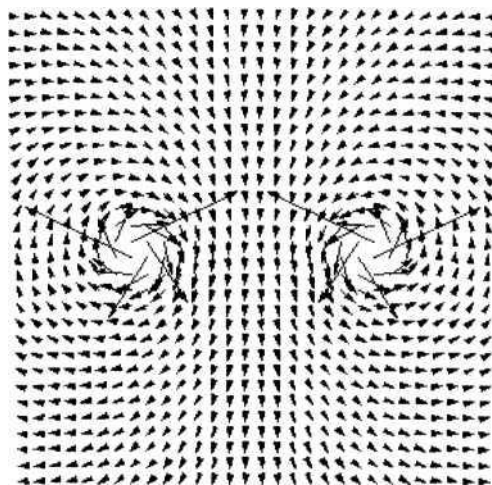


Рис.4.11.7, б. Карта векторного поля плотности вихревого тока  $j$  при условиях Рис.4.11.7, а. Кольцевые особенности вихревых токов соответствуют светлым областям этого рисунка и расположены напротив краев соленоида

Эффект нейтрализации поперечных компонент плотностей вихревого тока в проводящих средах возникает вследствие того, что ротор вихревого тока пропорционален ротору действительного векторного потенциала в каждой точке проводящей среды, то есть вектору магнитной индукции. Поскольку кулоновское магнитное поле от конца тонкого соленоида является потенциальным, то лапласиан от вектора плотности вихревого поля обращается в ноль в проводящей среде. Лапласиан от каждой из компонент плотности тока также обращается в ноль. Для поперечной к поверхности проводника компоненты плотности вихревого тока граничное условие обращения ее в ноль на этой поверхности приводит к тривиальному решению, равному нулю во всей области проводящей среды (в силу теоремы о существовании и единственности решений уравнения Лапласа для гармонических функций [2]). При этом предполагается, что магнитное поле меняется во времени достаточно медленно для того, чтобы соответствующие переходные процессы релаксации успевали происходить в проводящей среде. Время этой релаксации зависит от удельной проводимости и диэлектрической проницаемости среды так, что оно уменьшается при возрастании первой и убывании второй. Поэтому везде далее предполагаем, что время релаксации много меньше периода колебаний магнитного поля. Аналогичное утверждение справедливо и для толстых соленоидов, которые в действительности могут быть представлены в виде суперпозиции достаточно большого числа параллельно расположенных одинаковых, тонких соленоидов, так чтобы их средняя плотность в сечении толстого соленоида аппроксимировала магнитный поток внутри последнего. Добавляя в приведенные выше формулы слагаемые, соответствующие этим дополнительным, тонким соленоидам, получаем картины распределения плотностей вихревых токов для случая произвольных толстых соленоидов, аналогичные указанным графикам, но более размытые и светлые.

Кроме модели представления поля толстого соленоида набором параллельных, тонких соленоидов, упомянутой выше, можно использовать также аппроксимацию поля катушки в виде набора достаточно большого числа соосных кольцевых витков с током, расположенных на равных расстояниях друг от друга и имеющих одинаковый радиус. Дело в том, что магнитное поле простого кольцевого витка и поле его векторного потенциала хорошо известно и выражается через эллиптические интегралы  $E(k)$  и  $K(k)$  (см., например, [2]). Для одного витка радиуса  $a=2$  см имеем набор формул для введения в программный пакет "МАТЕМАТИКА 4":

```

A:=((a/r)^(1/2))
(((2/k)-k) EllipticK[k^2]-(2/k)EllipticE[k^2];
a:=2; k:=(4ar/((a+r)^2+Z^2))^(1/2); F:=Ar;
Hr:=(Z/(r(((a+r)^2+Z^2)^(1/2))))
(-EllipticK[k^2]+((a^2+r^2+Z^2)/((a-r)^2+Z^2))EllipticE[k^2]);
Hz:=(1/(r(((a+r)^2+Z^2)^(1/2))))
(-EllipticK[k^2]+((a^2-r^2-Z^2)/((a-r)^2+Z^2))EllipticE[k^2]);

```

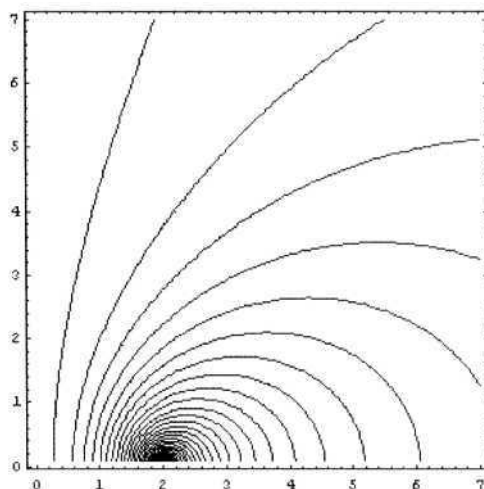


Рис.4.11.8. Картина силовых линий магнитного поля от одного витка с его центром в начале координат и радиусом 2 см

Картина силовых линий магнитного поля для одного витка имеет вид:

```
ContourPlot [F, {r,0,7},{Z,0,7}, PlotPoints → 100,  
ContourShading → False, Contours → 30, PlotRange → All];
```

Для системы из, например, 10 одинаковых витков, расположенных один над другим вдоль оси  $z$ , получаем простую суперпозицию выражений для одного витка, но с последовательным шагом в 1 см по высоте  $z$ . Тогда имеем

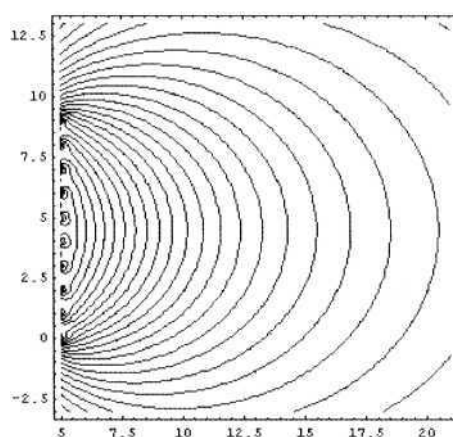


Рис.4.11.9. Картина силовых линий магнитной индукции для вертикальной катушки из 10 витков. Центр нижнего витка расположен в начале координат.  
Расстояния даны в см

следующую картину силовых линий магнитного поля вертикальной цилиндрической катушки "в профиль":

Над верхним торцом толстого соленоида силовые линии магнитной индукции выглядят как:

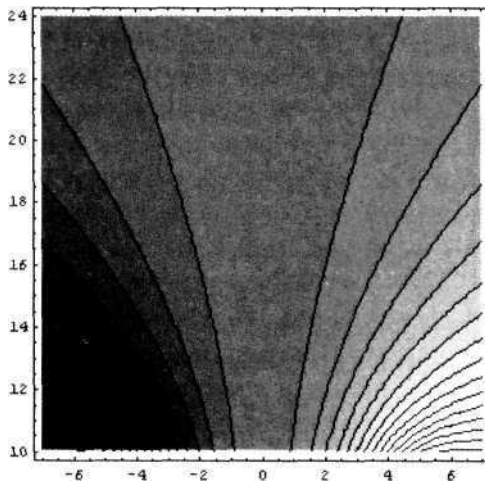


Рис.4.11.10. Картина силовых линий магнитной индукции от верхнего торца катушки из Рис.4.11.9. Густота заливки характеризует величину функции  $F(r)=Ar$ , линии постоянного уровня которой совпадают с силовыми линиями магнитной индукции

```
ContourPlot [F, {r, -7, 7}, {Z, 10.01, 24}, PlotPoints -> 100,
Contours -> 30, PlotRange -> All];
```

На глубине 3 см соответствующая картина векторных полей плотности вихревых токов после вычисления на компьютере имеет вид:

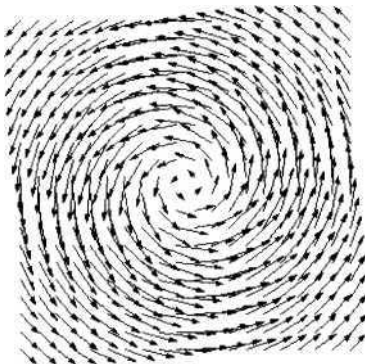


Рис.4.11.11. Картина векторного поля плотности вихревого тока от катушки Рис.4.11.9 в слое проводящей среды на глубине 3 см

*PlotVectorField [{AX, AY}, {X, -10.01, 10},{Y, -10.01, 10},  
PlotPoints -> 100, ScaleFactor->None];*

В заключение параграфа приведём пример конкретного расчета вихревого электрического поля и тока в биологической ткани с проводимостью  $\lambda \sim 1$  1/Ом м на глубине 2 см для катушки с параметрами Рис.4.11.1 при внутриимпульсной частоте колебаний 100 Гц. Выпишем решение задачи для этого случая.

Магнитная индукция  $B(z)$  на оси соленоида в формулах (8,9) изменяется от максимума до минимума за время половины периода колебаний, что согласно уравнениям Максвелла приводит к возникновению вихревого электрического поля с амплитудой  $E_\phi(r, z, t)$ , зависящей как от глубины  $z$ , так и от расстояния до оси соленоида  $r$ . Вблизи оси соленоида в первом приближении  $E_\phi(r)$  пропорциональна  $r$ .

Поток магнитной индукции  $B(z)$  через круг радиуса  $r$  равен  $B(z)\pi r^2$ , где  $\pi r^2$  — это площадь круга в  $m^2$ . Изменение этого потока за время  $T=0.005$  с приводит к ЭДС вихревого электрического поля  $E_\phi(r)2\pi r$ . Отсюда имеем равенства:

$$(B(z)\pi r^2/T)=E_\phi(r)2\pi r, \quad E_\phi(r) = (B(z)r/2T). \quad (13)$$

Подставляя в (13) характерный радиус  $r=2$  см,  $B(z)=0.025$  Тл и  $T=0.005$  с, получим для напряженности вихревого электрического поля оценку  $E_\phi=10^3$  В/см=1 мВ/см. Для среды с удельной проводимостью биологической ткани  $\lambda \sim 1$  1/Ом м [3] плотность тока для таких величин вихревых электрических полей, согласно уравнению (6), равна:

$$J=\lambda E_\phi=(10^{-2} \text{ 1/Ом см})(10^{-3} \text{ В/см}) \sim 10^{-5} \text{ А/см}^2 \sim 10 \text{ мкА/см}^2.$$

Отметим, что величина вихревого тока не зависит от диэлектрической проницаемости среды, поскольку определяется изменением во времени вектора напряженности электрического поля  $E$ , а не электрического смещения  $D$ , и зависит только от удельной проводимости среды.

## Заключение

Приведенные выше примеры расчета магнитной индукции и вихревых токов в слабо проводящей среде биологической ткани от катушки переменного тока низкой частоты с ферритовым сердечником показывают, что пакет программ "МАТЕМАТИКА 4" является удобным средством не только для решения соответствующих задач магнитостатики и уравнений Максвелла, но и для подходящего графического представления результатов. При этом использование той или иной формулы определяется как самой постановкой задачи, так и конкретными параметрами исследуемой системы и необходимой точностью расчета.

Самую простую, и соответственно, самую грубую прикидку величины магнитной индукции внутри цилиндрической катушки дает формула (7), которая при использовании магнитного сердечника принимает вид:

$$B=4\pi nI/10^7 \text{ Тл.}$$

Для оценки величины магнитной индукции на оси цилиндрической катушки, у которой длина  $h$  сравнима с ее радиусом  $a$ , наиболее употребляемой является формула (8), которая с учетом (9) принимает уже более сложный вид:

$$B=4\pi nI(z/(a^2+z^2)^{1/2}+(h-z)/(a^2+(h-z)^2)^{1/2})/10^7 \text{ Тл.}$$

Как подтвердили прямые измерения магнитного поля на расстоянии до нескольких сантиметров от такой катушки с помощью стандартного магнитометра, такая формула позволяет рассчитать величину поля с точностью до 10%, что оказывается вполне достаточным для практического применения.

Еще более громоздкий вид принимают расчетные формулы, когда нужно оценить величину магнитного поля в случае нецилиндрической формы катушки, что бывает необходимо по соображениям облегчения "доставки" нужной величины поля к нужному органу тела человека. Главное правило здесь состоит в том, что, например, для катушки с эллиптическим сечением намотки витков величина магнитного поля на расстоянии от нее, большем ее ширины, пропорциональна телесному углу, под которым она видна из точки наблюдения, т.е. примерно площади ее сечения. Поэтому величина магнитного поля от нее будет настолько же меньше поля от соответствующей цилиндрической катушки, насколько меньше ее площадь площади круга.

Кроме того, бывает необходимо для той же цели "вывести" ферритовый сердечник за пределы катушки. В этом случае при оценке величины магнитной индукции вблизи поверхности сердечника нужно использовать правило равенства магнитного потока внутри и вне катушки. Тогда расширение сечения сердечника будет приводить к уменьшению магнитной индукции, а сужение — к ее увеличению.

Формулы для расчета величины магнитной индукции на удалении как от края катушки, так и от ее оси, также существенно усложняются по мере увеличения расстояния до оси. Они нужны для оценки величины и пространственного распределения векторного поля вихревых токов в среде, которые в свою очередь необходимы для определения физико-химических механизмов воздействия постоянных и переменных низкочастотных магнитных полей на органы и ткани человека [4]. Для этих формул вполне доступны расчеты с использованием разложения в ряд выражений для компонент магнитного поля в цилиндрических координатах типа (11), оставляя необходимое число членов разложения.

## Литература

Э.Г.Калашиников. "Общий курс физики". Электричество. "Наука". Москва. 1977. Гл.8, стр. 150.



- В.В. Батыгин, И.Н.Топтыгин.* "Сборник задач по электродинамике".  
"Наука". Москва. 1970. Гл.V, стр. 62.
- S.J.Williamson, L.Kaufman,* JMMM, 1981, 22, 129.
- В.Н.Бинги, А.В.Савин.* УФН, 2003, 173, №3, 265.

## ГЛАВА 5.

### ПЕРСПЕКТИВНЫЕ МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ ПОСТОЯННЫХ МАГНИТОВ

#### 5.1. Необходимые условия для возникновения упорядоченных магнитных структур в твердых телах

Магнитное упорядочение (упорядоченное пространственное расположение магнитных моментов) наиболее изучено в твердых телах, обладающих дальним порядком в расположении атомов и кристаллической решеткой, в узлах которой периодически располагаются атомы с магнитными моментами. Физики и материаловеды интенсивно изучают также физические (в том числе и магнитные) свойства аморфных материалов, где существует только ближний порядок в расположении атомов. К ним относятся, в частности, металлические сплавы, получаемые быстрой закалкой из жидкого состояния (металлические стекла). Аморфная структура этих материалов характеризуется неупорядоченным расположением атомов, что приводит иногда к сильным изменениям их магнитных и других физических свойств по сравнению с их кристаллическими аналогами. В статье рассмотрены особенности магнитных свойств магнитоупорядоченных веществ в связи с особенностями атомной структуры как кристаллических, так и аморфных веществ.

Простейшая интерпретация физических механизмов, ответственных за упорядоченное пространственное расположение магнитных атомных моментов в твердых телах, основывается на следующих представлениях. Прежде всего надо отметить, что необходимым условием такого упорядочения является наличие у атомов собственных магнитных моментов, благодаря чему возможно образование спонтанного магнитного момента даже при отсутствии магнитного поля. В магнетиках, где существуют только магнитные моменты, локализованные на атомах, магнитный момент образца  $M$  складывается из магнитных моментов атомов ( $i$  - номер атома)

$$M = \sum_{i=1}^N \mu_i \quad (1)$$

где суммирование ведется по всем магнитным атомам. Намагниченность есть магнитный момент единицы объема  $V$

$$I = \frac{M}{V} \quad (2)$$

Часто рассматривают удельную намагниченность — магнитный момент на 1 г вещества. Внешнее магнитное поле создает дополнительную намагниченность за счет ориентации магнитных моментов и индуцирования диамагнитного момента. Эта намагниченность складывается со спонтанной. Кроме того, магнитное поле может деформировать и даже разрушать магнитную структуру.

В общем случае намагниченность образца не может быть получена как сумма магнитных моментов изолированных и невзаимодействующих ионов, поскольку в металлах и сплавах большую роль играет коллективизация электронов, которые образуют магнитный момент электронной подсистемы. В кристаллических и аморфных веществах сильное взаимодействие между электронами внешних (или валентных) оболочек соседних атомов приводит к образованию энергетической зоны делокализованных электронных состояний.

Делокализованные электроны вносят существенный вклад в результирующую намагниченность. Электронные подоболочки элементов группы железа (с незаполненной  $3d$ -подоболочкой) и группы лантанидов - редких земель (с незаполненной  $4f$ -подоболочкой) в разной мере подвергаются воздействию соседних ионов.  $4f$ -подоболочка экранирована вышележащими электронными слоями  $5s^25p^6$  от действия электростатических полей окружающих ионов и сравнительно слабо изменяется, то есть сохраняет свои атомные и магнитные характеристики (за исключением некоторых легких редкоземельных ионов).  $3d$ -подоболочка слабо экранирована, и для электронных плотностей  $3d$ -электронов существует в кристаллической решетке заметное перекрытие с электронными плотностями окружающих электронов. В кристаллических и аморфных металлах и сплавах  $3d$ -элементы, как правило, не сохраняют свои атомные магнитные моменты, характерные для изолированных атомов и ионов.

В случае изоляторов и полупроводников коллективизация  $3d$ -электронов выражена не столь резко, однако большую роль приобретают эффекты, обусловленные действием кристаллических полей на электронные состояния, в результате чего энергетические уровни  $3d$ -электронов расщепляются. В нормальном (основном) состоянии заняты нижние энергетические уровни и  $3d$ -ион может иметь различные значения магнитного момента в зависимости от своего атомного окружения в кристаллической решетке. Некоторые ионы редких земель (особенно легкие, такие, как церий) также обнаруживают изменение величины магнитного момента иона при действии электростатических полей, создаваемых окружающими ионами. Таким образом, в кристаллических и аморфных веществах природа магнитных моментов, обусловленных  $3d$ - и  $4f$ -ионами, сложна и многообразна.

Величина намагниченности, измеренной при определенной температуре, зависит не только от значений атомных магнитных моментов, но и от взаимодействий между ними. Магнитного взаимодействия магнитных моментов недостаточно, чтобы объяснить наблюдающиеся на опыте значения температур Кюри ферромагнетиков. Теплового движения при температурах в десятки

доли Кельвина уже достаточно, чтобы разрушить магнитное упорядочение за счет магнитного взаимодействия.

Другое необходимое условие магнитного упорядочения заключается в наличии в твердых телах обменного взаимодействия [Вонсовский С.В., 1984]. Оно является частью электростатического взаимодействия, зависящего от ориентации спинов взаимодействующих электронов. Обменное взаимодействие возникает благодаря квантовомеханическим эффектам и изменяется с расстоянием между магнитными ионами. Взаимное геометрическое расположение ионов также оказывает влияние на его величину.

В. Гейзенберг получил общее выражение для энергии обменного взаимодействия

$$E_{\text{обм}} = - \sum_{ij} A_{ij} S_i S_j , \quad (3)$$

где  $S_i$  и  $S_j$  — спины взаимодействующих электронов, а  $A_{ij}$  — обменный интеграл, зависящий от расстояний между электронами  $r_{ij}$ . Суммирование ведется по всем спинам  $i$  и  $j$ , входящим в систему.

На магнитный момент иона как в кристаллическом, так и в аморфном магнетике действует также электростатическое поле, создаваемое окружающими ионами. Это поле называют локальным кристаллическим полем. Оно создает локальную ось легкого намагничивания, вдоль которой и располагается магнитный момент. В простейшем случае энергия спина в этом поле (энергия локальной магнитной анизотропии) имеет вид

$$E_{\text{обм}} = - D S_z^2 , \quad (4)$$

где  $D$  — константа локальной магнитной анизотропии, а  $S_z$  — проекция спина иона на направление локальной оси  $z$ .

Суммарная энергия обменных взаимодействий и энергий локальной анизотропии получится суммированием соотношений (3) и (4)

$$E_{\text{обм}} = - \sum_{ij} A_{ij} S_i S_j - \sum_i D_i (S_z)^2 . \quad (5)$$

В кристаллическом веществе ось легкого намагничивания совпадает с одним из кристаллографических направлений, в аморфном — локальные оси легкого намагничивания разбросаны по всем направлениям беспорядочно.

Из соотношения (5) следует, что соответствующая минимуму энергии магнитная структура — взаимная ориентация спинов будет определяться величиной и знаком обменных интегралов и констант локальной анизотропии.

Обменное взаимодействие приводит к появлению некоторого эффективного обменного поля, которое ниже определенной температуры  $T_c$  преодоле-

вает дезориентирующее действие теплового движения. В результате при  $T < T_c$  возникает кооперативный эффект — магнитное упорядочение. Эту температуру  $T_c$  называют температурой магнитного упорядочения. Магнитное упорядочение характеризуется упорядоченным расположением магнитных моментов атомов, которое возникает при  $T < T_c$  даже при отсутствии внешнего магнитного поля. В этом состоит отличие кооперативного магнетизма от некооперативного (парамагнетизм и диамагнетизм), где магнитные моменты ионов ведут себя совершенно независимо.

## 5.2. Ферромагнитное упорядочение

На первом этапе изучения магнитного упорядочения твердых тел физики имели дело с ферромагнетизмом, который характеризуется параллельным (коллинеарным) дальним порядком в расположении магнитных моментов в системе. В ферромагнетиках обменное взаимодействие преодолевает дезориентирующее действие теплового движения при  $T < T_c$  и ориентирует магнитные моменты параллельно. Некоторый разброс в ориентации магнитных моментов вследствие теплового движения подавляется обменным взаимодействием при  $K$ . В ферромагнетиках обменные интегралы положительны ( $A_{ij} > 0$ ) и обменное взаимодействие преобладает над другими видами взаимодействий, чувствительными к ориентации магнитных моментов. Наличие макроскопической намагниченности образца сильно увеличивает магнитостатическую энергию. Ее минимизация происходит тогда, когда образец разбивается на домены, внутри которых есть спонтанная намагниченность вдоль оси легкого намагничивания, которой является одна из кристаллических осей. Температурная зависимость спонтанной намагниченности  $I_s$  приведена на рис. 1, а. Видно, что величина  $I_s$  монотонно уменьшается с нагреванием и исчезает при  $T > T_c$ .

При  $T > T_c$  имеет место парамагнитное состояние с хаотической ориентацией магнитных моментов при  $H = 0$ , при  $T < T_c$  возникает ферромагнитное состояние с параллельной ориентацией магнитных моментов (рис. 5.2.1, б).

При увеличении магнитного поля  $H$  намагниченность образца возрастает за счет смещения границ доменов и процессов вращения спонтанной намагниченности. Первый процесс связан с ростом объема доменов, у которых направление  $I_s$  ориентировано наиболее выгодно энергетически по отношению к полю (угол между  $I_s$  и  $H$  наименьший). Второй процесс — вращение — обусловлен поворотом векторов  $I_s$  от оси легкого намагничивания к направлению приложенного магнитного поля.

В парамагнитной области при  $T > T_c$  для магнитной восприимчивости с выполняется закон Кюри-Вейса

$$\frac{1}{\chi} = \frac{T - \theta_p}{C} \quad (6)$$

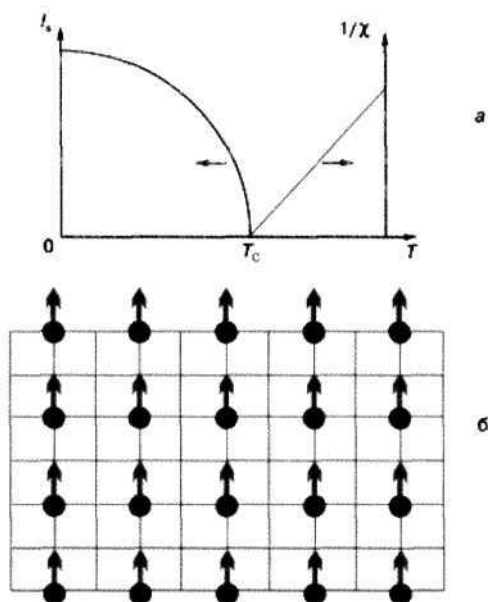


Рис. 5.2.1, а — температурные зависимости спонтанной намагниченности  $I_s$  и обратной магнитной восприимчивости ферромагнетика;  
б — ферромагнитная структура

где — парамагнитная точка Кюри, а  $C$  — постоянная Кюри-Вейсса. Как можно видеть на рис. 5.2.1, а, величина для ферромагнетиков изменяется линейно с температурой. В изотропных однородных по составу ферромагнетиках с малой магнитной анизотропией  $T_C$  и имеют близкие значения. В анизотропных ферромагнетиках величина принимает разные значения для оси легкого намагничивания и оси трудного намагничивания, а также заметно отличается от температуры Кюри  $T_C$ .

В ферромагнетиках, где магнитные моменты электронов локализованы на ионах (например, неметаллические ферромагнетики, редкоземельные металлы иттриевой подгруппы  $Gd$ ,  $Tb$ ,  $Dy$ ), спонтанная намагниченность образца складывается из магнитных моментов изолированных ионов. Постоянная Кюри-Вейсса связана с эффективным магнитным моментом иона в ферромагнетиках с локализованными магнитными моментами:

$$C = \frac{\mu_0^2}{3k_B} \quad (7)$$

где  $k_B$  — постоянная Больцмана. Для редких земель хорошо выполняется соотношение

$$\mu_0 // = \mu_B g \sqrt{J(J+1)} \quad (8)$$

Здесь  $J$  — квантовое число полного механического момента для данного иона,  $g$  — фактор Ландэ (определяется квантовыми числами, характеризующими энергетическое состояние иона), — магнетон Бора (единица измерения атомных магнитных моментов и собственный магнитный момент электрона).

Из величины удельной намагниченности насыщения при температурах, близких к  $T = 0$  К (обычно при  $T = 4,2$  К), можно найти магнитный момент, приходящийся на атом в ферромагнетике в магнитоупорядоченном состоянии:

$$\mu_0 = \frac{\mu \sigma_1(0)}{N} \quad (9)$$

где  $\mu$  — молекулярный вес вещества,  $N$  — число Авогадро ( $N = 6,022 \cdot 10^{23}$  моль<sup>-1</sup>), — удельная намагниченность (на 1 г) при  $T = 4,2$  К.

Ферромагнетики находят широкое применение в технике. На их основе разработаны магнитные материалы: магнитомягкие (высокие значения магнитной проницаемости), магнитожесткие (высокие значения коэрцитивной силы и магнитной энергии), материалы для магнитной записи и др.

Для ферромагнетиков на основе редких земель с локализованными моментами 4/-электронов

$$\mu_0 = \mu_B g J \quad (10)$$

Здесь  $J = L + S$ , где  $L$  и  $S$  — орбитальное и спиновое квантовые числа. Для немагнитических ферромагнетиков на основе 3d-элементов, где орбитальный момент "заморожен" кристаллическим полем ( $L = 0$ ):

$$\mu_0 = \mu_B S. \quad (11)$$

В металлических ферромагнетиках, таких как железо, кобальт, никель и их сплавы, ферромагнетизм обусловлен коллективизированными электронами. Он возникает вследствие неодинаковой заселенности этими электронами двух энергетических зон: первая зона со спинами электронов, ориентированными в одну сторону, и вторая зона со спинами в противоположную сторону. Различают сильный и слабый ферромагнетизм коллективизированных электронов. У первых магнитные электроны полностью заполняют одну из зон. У вторых магнитные электроны содержатся в обеих подзонах. Величина спонтанной намагниченности и температура магнитного упорядочения — температура Кюри — определяются формой кривой плотности энергетических состояний электронов вблизи уровня Ферми. Плотность энергетических состояний — это число энергетических состояний на единичный интервал энергии зон-

ных электронов. Спонтанный момент  $M$  пропорционален разности чисел электронов в зоне  $+$  и в зоне  $-$  :

$$M = M_B(N_+ - N_-). \quad (12)$$

Поскольку  $N_+$  и  $N_-$  различаются по величине, спонтанный момент не равен нулю. Он, как правило, не кратен магнетону Бора.

### Антиферромагнитное упорядочение

В идеальном антиферромагнетике одинаковые магнитные ионы занимают в кристаллической решетке кристаллографически эквивалентные позиции и образуют две взаимопроникающие ферромагнитные подрешетки, магнитные моменты которых ориентированы противоположно, в результате чего спонтанная намагниченность образца отсутствует. Антиферромагнетизм — это также кооперативное явление, которое характеризуется дальним порядком в системе магнитных моментов. Каждый ион окружен ионами с магнитными моментами, ориентированными противоположно его магнитному моменту. Это обусловлено тем, что обменные интегралы  $A_{ij}$  являются отрицательными ( $A_{ij} < 0$ ) и превышают по абсолютной величине магнитокристаллические взаимодействия.

Магнитная восприимчивость антиферромагнетика имеет максимум при температуре Нееля  $T_N$ . При  $T > T_N$  тепловое движение разупорядочивает дальний антиферромагнитный порядок и вещество становится парамагнетиком. Магнитная восприимчивость при  $T > T_N$  удовлетворяет закону Кюри-Вейсса (6) с отрицательным значением парамагнитной температуры Кюри.

Наиболее простое магнитное поведение у антиферромагнитных окислов ( $MnO$ ,  $CoO$ ,  $FeO$ ) и хлоридов  $Fe$ ,  $Co$  и  $Ni$ . Некоторые  $3d$ -элементы ( $O$ ,  $-Mn$ ) и  $4f$ -элементы ( $Cr$ ,  $Nd$  и др.) имеют более сложные антиферромагнитные структуры, для описания которых недостаточно модели двух подрешеток. Недавно обнаружен антиферромагнетизм в полупроводниках (халькогениды  $Mn$ ,  $Cr$ ,  $Eu$  и  $Gd$ ). В последнее время вызывают значительный интерес антиферромагнитные редкоземельные ферриты-гранаты, в которых ионы железа замещены алюминием и галлием ( $Dy_3Al_5O_{12}$  и  $Dy_3Ga_5O_{12}$ ). В них наблюдаются трансформации антиферромагнитной структуры при действии магнитного поля. Эти соединения представляют интерес в качестве магнитных хладоагентов для получения низких температур методом магнитного охлаждения в магнитных холодильных машинах.

В некоторых веществах комбинация обмена и спин-орбитального взаимодействия приводит к тому, что магнитные моменты подрешеток становятся не строго антипараллельны, вследствие чего возникает слабый ферромагнитный момент  $M$ . Такие магнетики называют слабыми ферромагнетиками. Слабый ферромагнетизм антиферромагнетиков был открыт и объяснен А.С. Боровиком-Романовым и И.Е. Дзялошинским. К их числу относятся редкоземельные ортоферриты ( $TbFeO_3$ ), гематит  $Fe_2O_3$ ,  $CoCO_3$  и др.



### 5.3. Ферримагнитное упорядочение

Ферримагнетик, так же как и антиферромагнетик, состоит из двух ферромагнитных подрешеток, магнитные моменты которых ориентированы навстречу друг другу (рис. 5.3.1, а). Однако в отличие от антиферромагнетиков эти магнитные моменты не равны друг другу, в результате чего образуется результирующая спонтанная намагниченность, которая исчезает выше температуры Кюри  $T_c$ . Различие магнитных моментов подрешеток обусловлено тем, что подрешетки образуются из ионов разных элементов либо из ионов одного и того же элемента, но с разной валентностью. Интересно отметить, что магнетит  $Fe_3O_4$ , первое сильномагнитное вещество, известное в глубокой древности, является ферримагнетиком. Одна подрешетка магнетита образована узлами кристаллической решетки с тетраэдрическим кристаллическим окружением, в которых располагаются ионы  $Fe^{3+}$ , другая подрешетка — узлами с октаэдрическим окружением, занятыми в равной доле ионами  $Fe^{2+}$  и  $Fe^{3+}$ . Таким образом, спонтанная намагниченность ферримагнетика равна разности намагниченностей подрешеток  $I_a$  и  $I_b$

$$I = I_b - I_a . \quad (13)$$

В случае магнетита  $|I_b| > |I_a|$  и кривая температурной зависимости  $I_s(T)$  напоминает аналогичную кривую для ферромагнетика. Однако существуют ферримагнетики, в которых магнитные моменты ионов в разных подрешетках находятся в неодинаковых эффективных обменных полях, что приводит к сильно различающейся температурной зависимости намагниченностей подрешеток  $I_b(T)$  и  $I_a(T)$ . Например, в ферритах-гранатах с общей формулой  $R_3Fe_5O_{12}$  (для  $R = Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm$ ) существует температура (ниже точки Кюри  $T_C$ ), где магнитные моменты подрешеток редкой земли  $I_R$  и железа  $I_{Fe}$  компенсируют друг друга, в результате чего спонтанная намагниченность обращается в ноль (рис. 5.3.1,6). Эта температура называется температурой магнитной компенсации  $T_{comp}$ .

В этих соединениях обменное поле  $H_R$ , действующее на ионы редких земель, значительно меньше, чем обменное поле, действующее на ионы железа  $H_{Fe}$ . Вследствие этого тепловое движение преодолевает ориентирующее действие  $H_R$  на магнитные моменты редких земель при температуре более низкой, чем температура Кюри  $T_c$ . При  $T = T_c$  тепловое движение преодолевает в основном ориентирующее действие обменного поля  $H_{Fe}$  на магнитные моменты атомов железа. Например, в феррите-гранате гадолиния редкоземельная подрешетка сильно разупорядочивается в основном при в то время как подрешетка железа — при В результате намагниченность  $I_R$  С температурой падает очень резко уже при в то время как  $I_{Fe}$  начинает сильно уменьшаться только

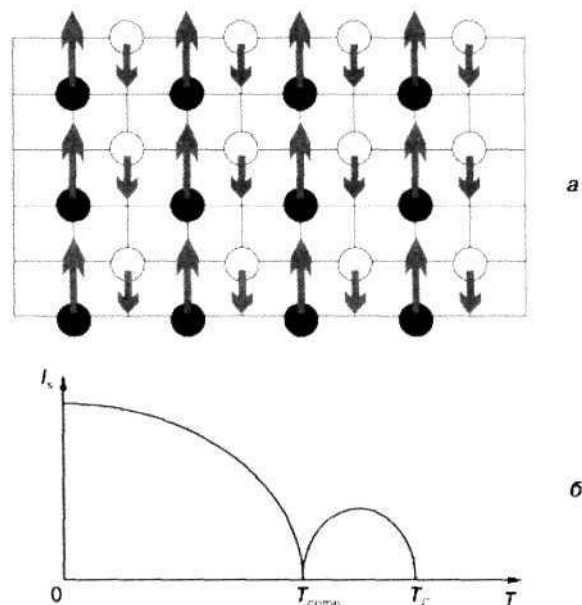


Рис. 5.3.1. а — ферримагнитная структура; б — температурная зависимость спонтанной намагниченности  $I_s$  для ферримагнетика с температурой магнитной компенсации

при . При  $T = T_{comp}$  происходит магнитная компенсация  $I_R = I_{Fe} \cdot T_{comp}$  существует не только в ферритах-гранатах, но и в металлических ферримагнитных соединениях  $ErFe_2$ ,  $ErFe_3$  и др.

В рассмотренных ферримагнетиках  $I_R(0) > I_{Fe}(0)$  при  $T = 0$  К. Однако в ряде соединений, например  $Tm_6Fe_{23}$ , при всех температурах  $I_R(0) < I_{Fe}(0)$  . В этом случае магнитной компенсации не наблюдается. Спонтанная намагниченность  $I = I_{Fe} - I_R$  при возрастании температуры от  $T = 0$  К сильно увеличивается в некотором интервале, что необычно по сравнению с классическими ферромагнетиками, где спонтанная намагниченность при нагревании только уменьшается.

В металлических ферримагнетиках обменное поле  $H_R$  существенно выше (в несколько раз), чем в ферримагнетиках-изоляторах и полупроводниках. Этот эффект обусловлен тем, что коллективизированные  $3d$ -электроны, подмагниченные собственным обменным взаимодействием, наводят сильную поляризацию в системе электронов проводимости. Эта поляризация сохраняется в металлах на сравнительно больших расстояниях от  $3d$ -атомов и создает сильные обменные поля  $H_R$ , что обеспечивает высокую степень магнитного упорядочения в редкоземельной подрешетке при высоких температурах. Благодаря такому обменному механизму уникальные свойства ионов редких земель проявляются в практически важной области комнатных температур.

При  $T > T_c$  ферромагнетик превращается в парамагнетик, однако магнитная восприимчивость изменяется с температурой по более сложному, чем в ферромагнетиках, закону Нееля. В этом случае кривая является нелинейной. В последние годы были разработаны новые редкоземельные ферромагнитные металлические материалы — мощные постоянные магниты и материалы с гигантской магнитострикцией. Широко используются в современной технике ферромагнитные полупроводники ферриты-шпинели  $MeOFe_2O_3$  ( $Me^{2+} = Mn^{2+}, Co^{2+}, Ni^{2+}, Mg^{2+}, Zn^{2+}$ ), ферриты-гранаты  $R_3F_5O_{12}$ , ферриты  $BaFe_{12}O_{19}$  и др. Благодаря низким потерям на высоких частотах ферриты применяются как сердечники магнитопроводов в дросселях, трансформаторах, магнитных антеннах, а также для управления электромагнитными колебаниями в устройствах сверхвысоких частот.

#### 5.4. Спиральные и периодические магнитные структуры

Спиральный магнетизм характеризуется спиральным расположением магнитных моментов относительно некоторых кристаллических осей. Он является частным случаем более общего явления — магнитного упорядочения с периодическим изменением компонентов атомных магнитных моментов вдоль кристаллографических направлений.

Наиболее простой случай таких структур -- антиферромагнитная спираль, или геликоид. Она встречается в редкоземельных металлах *Eu*, *Tb*, *Dy*, *Ho*, в соединении  $MnAu_2$  и некоторых окисных соединениях. Эту структуру можно представить как последовательность атомных плоскостей, перпендикулярных оси геликоида. Все атомы одной и той же плоскости имеют одинаково направленные магнитные моменты и образуют магнитный слой.

Компоненты магнитных моментов атомов по декартовым осям  $X$  и  $Y$ , проведенным в плоскости магнитного слоя, осциллируют:

$$S_x = S_0 \sin kz, \quad S_y = S_0 \cos kz. \quad (14)$$

В то же время проекции магнитных моментов на ось геликоида — кристаллографическую ось, перпендикулярную плоскостям магнитных слоев, равны нулю. Результирующий магнитный момент геликоида — антиферромагнитной спирали равен нулю.

В случае, если, имеем ферромагнитную спираль с некоторым результирующим моментом. Если осциллирует также и  $S_z$  по гармоническому закону

$$S_z = S_0 \sin kz \quad (15)$$

то образуется структура, называемая сложной магнитной спиралью.

Представляет интерес синусоидальная структура или статическая продольная спиновая волна, для которой компоненты  $S_x$  и  $S_y$  отсутствуют, а компонента по оси  $Z$  осциллирует:

$$S_x = 0, S_y = 0, S_z = S_{0z} \sin kz. \quad (16)$$

Такая структура реализуется в некотором интервале температур ниже точки Нееля в металлическом хrome и эрбии, непроводящих и полупроводниковых соединениях  $MnSe_2$ ,  $TbMnO_3$ ,  $NpAs$ .

Физические механизмы, приводящие к образованию периодических магнитных структур, весьма сложны и неодинаковы [Никитин С.А., 1989]. В наиболее простом случае образование спиральных магнитных структур объясняют конкуренцией положительных (ферромагнитных) обменных взаимодействий ( $A_1 > 0$ ) между ближайшими магнитными слоями и отрицательных (антиферромагнитных) обменных взаимодействий ( $A_2 < 0$ ) между слоями, следующими за ближайшими. В результате такой конкуренции и происходит поворот магнитных моментов на некоторый угол, величина которого определяется отношением  $|A_2|/A_1$ .

В металлических спиральных магнетиках период этих структур часто не совпадает с периодом кристаллической решетки. Это объясняют тем, что в металлах спиральное магнитное упорядочение локализованных электронов (например,  $4f$ -электронов) зависит от специфических особенностей энергетического спектра электронов проводимости ( $s$ -электроны), которые поляризуются за счет  $s$ - $f$ -обменного взаимодействия. Спиральное расположение магнитных моментов  $4f$ -электронов приводит к образованию плоскостей энергетических разрывов и энергетических щелей в энергетическом спектре электронов проводимости, что существенно модифицирует этот спектр.

В результате спиральное и периодическое расположение магнитных моментов становится энергетически более выгодным, чем простое ферромагнитное. В этом случае период магнитной структуры определяется предельным импульсом электронов проводимости — импульсом Ферми.

В последние годы в магнетиках было обнаружено большое число модулированных магнитных структур, период которых не связан с периодом кристаллической решетки (несоизмеримые структуры). Период модуляции может непрерывно изменяться с температурой, при этом его значения не совпадают с периодом кристаллической решетки. Однако при достижении некоторых значений, соизмеримых с периодом кристаллической решетки, период модулированной структуры в некотором интервале температур не изменяется. Другое новое явление, обнаруженное недавно, заключается в появлении в ряде магнетиков дополнительной модуляции периодической магнитной структуры (спин-слип-структуры). Здесь параллельные магнитные моменты соседних слоев как бы соединяются в небольшие блоки, а переход от одного блока к

другому сопровождается поворотом магнитных моментов блоков на некоторый угол.

## 5.5. Сперомагнетизм

В парамагнитном состоянии магнитный момент каждого отдельно выбранного иона испытывает сильные флуктуации, поэтому среднее значение по времени для проекции на любое направление равно нулю (при  $H = 0$ ). Представим себе, что мы охлаждаем парамагнетик, в котором обменные интегралы  $A_{ij}$  между соседними ионами  $i$  и  $j$  могут иметь как положительные, так и отрицательные значения. За счет обменных полей тепловые флуктуации ниже некоторой температуры  $T_{en}$  будут подавлены, однако магнитный момент подвергается противодействию локальных микроскопических полей в отличие от ферро- и антиферромагнетиков. В результате образуется магнитное состояние, в котором локализованные магнитные моменты испытывают сильные пространственные флуктуации. Проекция отдельного иона на выбранное направление (средняя по времени) имеет некоторое неравное нулю значение, как и в ферромагнетике, однако в целом по образцу ситуация меняется кардинально.

В самом деле проведем усреднение по микроскопическому объему, включающему ближайших соседей этого иона. Мы обнаружим, что в некоторых кристаллических и аморфных магнетиках существует равновероятное распределение магнитных моментов в любом микроскопическом объеме (за пределами ближайших соседей), вследствие чего спонтанная намагниченность равна нулю (рис. 5.5.1, а). Такие магнетики называются сперомагнетиками. У них температура сперомагнитного упорядочения  $T_{en}$  обнаруживается по размытому максимуму магнитной восприимчивости. При  $T > T_{en}$  существует обычный

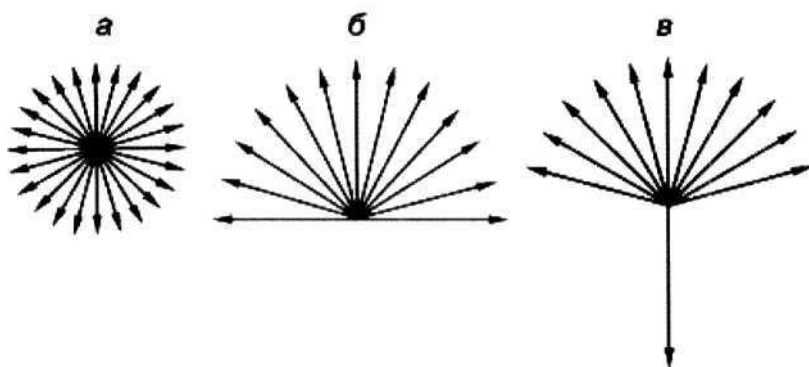


Рис. 5.5.1. Сперомагнитная (а), асперомагнитная (б) и сперимагнитная (в) структуры

парамагнетизм. Сперомагнетик обладает бесконечно большим числом различных расположений магнитных моментов, которые обладают спонтанной намагниченностью, равной нулю, и имеют одно и то же значение энергии. В них существуют громадное число равновероятных метастабильных состояний, переход между которыми приводит к термическому гистерезису намагниченности и временной нестабильности магнитных свойств. В этих метастабильных состояниях локальные распределения магнитных моментов ближайших ионов, окружающих данный ион, могут различаться. Такие состояния называются фрустрированными.

Какие физические механизмы могут приводить к фрустрациям? В металлических магнетиках возникает обменное взаимодействие между электронами незаполненных  $4f$ - (или  $3d$ -) подоболочек атомов переходных элементов и электронами проводимости. Энергия этого  $s-f$ -обменного взаимодействия может быть записана в виде [Вонсовский С.В., 1984]

$$E_{sf} = -A_s f S_e S_{4f}, \quad (17)$$

где  $A_s$  — интеграл  $s-f$ -обменного взаимодействия,  $S_{4f}$  — спин незаполненной  $4f$ -подоболочки,  $S_e$  — спин электрона проводимости. В результате  $s-f$ -обменного взаимодействия электроны проводимости подмагничиваются и приобретают некоторую поляризацию, которая осциллирует с затухающей амплитудой с удалением от  $4f$ -иона. Окружающие ионы могут попасть в область как с положительной, так и с отрицательной поляризацией. Знак обменного интеграла определяется направлением поляризации электронов проводимости и расстоянием между ионами [Никитин С.А., 1989]. Наличие положительных и отрицательных обменных интегралов и приводит к сперомагнетизму в некоторых сплавах с невысокой концентрацией парамагнитных ионов (например,  $CuMn$ , некоторые аморфные сплавы редких земель с  $3d$ -переходными элементами). Знакопеременные значения обменного интеграла возникают иногда и при прямом перекрытии волновых функций  $3d$ -элементов, если расстояния между взаимодействующими ионами имеют некоторый разброс в своих значениях. В аморфных магнетиках [Золотухин И.В., 1986] и прямое и косвенное (через электроны проводимости) обменные взаимодействия могут создать распределения значений  $A_{ij}$  с положительным и отрицательным знаками.

Сперомагнетизм также часто возникает в "спиновых" стеклах [Херд К.М., 1984, Золотухин И.В., 1986, Г. Бек, Г. Гюнтеродт, 1986] — системах, являющихся твердыми растворами с небольшой концентрацией магнитных ионов в матрице из "немагнитных" ионов. В последние годы к спиновым стеклам проявляется значительный интерес как со стороны физиков-экспериментаторов, так и теоретиков. Для объяснения их необычных магнитных свойств требуется развитие принципиально новых теоретических моделей. В принципе они могут служить и в практическом отношении как среды с чрезвычайно

высокой плотностью записи информации, в частности благодаря тому, что в них отсутствует доменная структура.

## 5.6. Асперомагнитная структура

В асперомагнетиках локализованные магнитные моменты ниже некоторой температуры магнитного упорядочения *T<sub>асп</sub>* ориентируются в различных атомных позициях случайным образом, но с преимущественной ориентацией вдоль некоторого направления. Средние значения проекций на эту ось не равны нулю, вследствие чего возникает спонтанная намагниченность.

Асперомагнетизм довольно часто встречается в аморфных материалах - сплавах и соединениях 4*f*- и 3*d*-элементов. В ряде этих магнетиков флуктуации обменных полей выражены менее резко, поэтому в асперомагнетиках имеется некоторое преимущественное направление для магнитных моментов. В этом случае магнитные моменты стремятся ориентироваться в направлении локальных осей анизотропии, и, если бы не было обменных взаимодействий, это могло бы привести к сперомагнетизму. Однако обменное поле стягивает магнитные моменты в пределах полусферы (см. рис. 5.5.1, б). Асперомагнетизм такого типа встречается в аморфных сплавах типа *Tb-Ag*, *Dy-Ni* и др.

## 5.7. Сперимагнитная структура

При наличии флуктуаций обменных и магнитокристаллических взаимодействий в магнетике, состоящем из двух (или более) магнитных подсистем, связанных между собой отрицательными обменными взаимодействиями, возможно образование сперимагнитной структуры. Она до некоторой степени похожа на ферримагнитную структуру. В ней также магнитные моменты подрешеток (в кристаллических материалах) или подсистем (в аморфных материалах) направлены противоположно друг другу. Отличие заключается в том, что в сперимагнетике магнитные моменты в одной или обеих подсистемах ориентируются случайным образом в пределах некоторого пространственного конуса (рис. 5.5.1, в). Такая ситуация возникает как в кристаллических, так и в аморфных материалах, если ионы одного сорта обладают сильной локальной одноионной анизотропией *D*, которая несколько меньше интеграла *A* обменного взаимодействия между ионами из разных магнитных подсистем (например, аморфные соединения *Tb-Fe*, *Tb-Co*).

Более полная информация о магнитных структурах и магнитном упорядочении, а также ссылки на оригинальные работы и сведения по истории развития исследований магнитных структур содержатся в монографиях, книгах и обзорах [Вонсовский С.В., 1984, Каганов М.И., Цукерник В.М., 1982, Белов К.П., Бочкарев Н.Г., 1983, Никитин С.А., 1989, Херд К.М., 1984, Золотухин И.В., 1986, Г. Бек, Г. Гюнтеродт, 1986].

## Заключение

Представленный материал дает только предварительные сведения о магнитных структурах. Проблема магнитного упорядочения в твердых телах вряд ли будет решена в ближайшие годы. Можно ожидать новых необычных явлений. Каждый год обнаруживают новые магнетики, многие из которых имеют довольно сложные магнитные структуры, предсказать которые из общих соображений иногда почти невозможно. Это говорит о том, что в теории магнетизма еще многое предстоит сделать, чтобы понять природу и многообразие магнитных структур в конденсированных веществах.

## Литература

Вонсовский С.В. Магнетизм. М.: Наука, 1984. 207 с. Каганов М.И., Цукерник В.М. Природа магнетизма. М.: Наука, 1982. 192 с. Белое К.П., Бочкарев Н.Г. Магнетизм на земле и в космосе. М.: Наука, 1983. 192 с. Никитин С.А. Магнитные свойства редкоземельных металлов и их сплавов. М.: МГУ, 1989. 248 с. Херд К.М., Многообразие видов магнитного упорядочения в твердых телах // Успехи физ. наук. 1984. Т. 142. N 2. С. 331-335. Золотухин И.В. Физические свойства аморфных металлических материалов. М.: Металлургия, 1986. 176 с. Металлические стекла. Вып. 2 / Пер. под ред. Г. Бека, Г. Гюнте-родта. М.: Мир, 1986. 456 с.

Источник: [www.phys.web.ru](http://www.phys.web.ru)

## 5.8. Аморфные магнетики

**Аморфные магнетики** — класс магнитных материалов, сочетающих определенную магнитную атомную структуру, например, ферромагнитную, с аморфной атомной структурой в ограниченном интервале температур. Возможность существования аморфных магнетиков была впервые показана теоретически в 1960 г. А. И. Губановым. Полученные аморфные магнетики по магнитным свойствам не уступают или близки к лучшим кристаллическим магнитным материалам, но технология их изготовления существенно проще.

Особенности магнитного состояния аморфных магнетиков определяются особенностями аморфного состояния вещества - отсутствием дальнего и наличием ближнего атомного порядка, термодинамической неравновесностью, флуктуациями атомных магнитных моментов, обменных и анизотропных взаимодействий. Указанные флуктуации и топологические особенности строения "сетки" атомов аморфного вещества формируют магнитные структуры аморфных магнетиков. Теоретические и экспериментальные исследования показали, что существуют следующие типы аморфных магнетиков: ферромагнетики (ФМ), спиновые стекла (СС), ферримагнетики (ФИМ), неупорядоченные



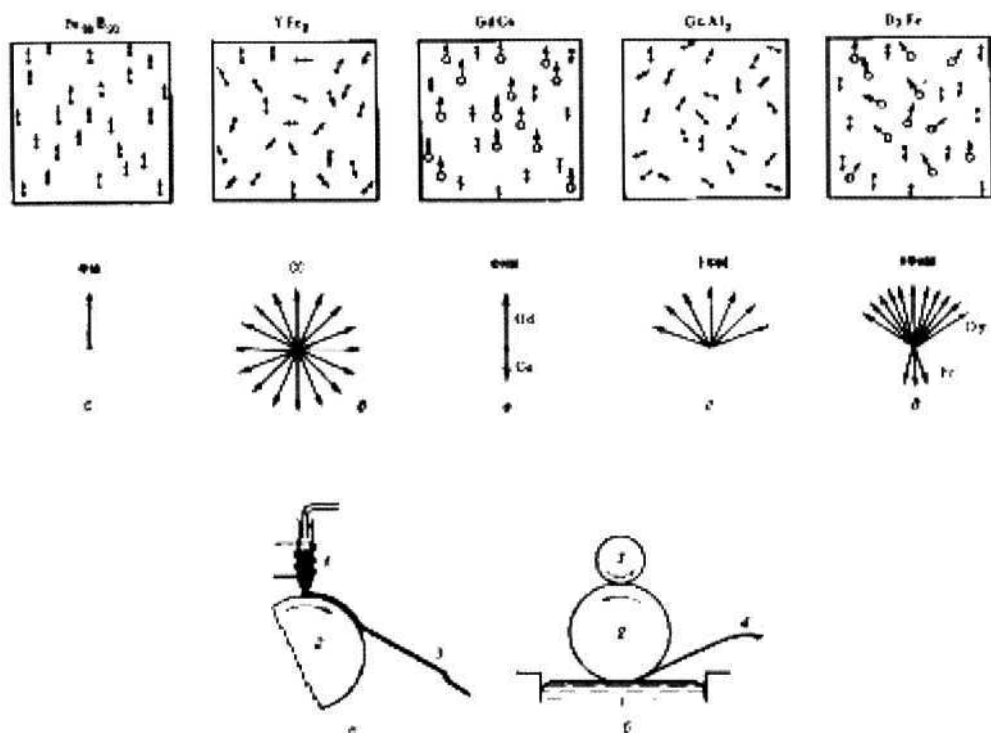


Рис.5.8.1.

ферромагнетики (НФМ), неупорядоченные ферримагнетики (НФИМ). Последние два типа аморфных магнетиков называются также асперомагнитными и сперимагнитными соответственно. Теория допускает также возможность неупорядоченного антиферромагнитного состояния. На рис. 5.8.1 схематически представлены указанные структуры аморфных магнетиков и примеры магнетиков соответствующих типов. Во всех магнитных структурах аморфного магнетика (кроме СС) существует дальний магнитный порядок.

Структуры ФМ и НФМ (рис. 5.8.1, а, г) имеют ненулевой макроскопический спонтанный магнитный момент (МО). Их различие связано со стохастичностью и существенной неколлинеарностью структуры НФМ. Состояние СС (рис.5.8.1,б) представляет собой систему хаотически "замороженных" в пространстве магнитных моментов с общим моментом  $M=0$ . Наконец, состояния ФИМ и НФИМ (рис. 5.8.1, е, д) характерны для двухкомпонентных систем типа сплавов переходных  $3d$ - и  $4f$ -металлов. НФИМ отличается неупорядоченностью и неколлинеарностью магнитных моментов.

Физические свойства аморфных магнетиков специфичны, например, перевод магнетика в аморфное состояние вызывает, как правило, снижение температуры магнитного фазового перехода в парамагнитное состояние. Флуктуации обменных взаимодействий в случае аморфного ФМ увеличивают скорость снижения спонтанной намагниченности при увеличении температуры. Энергетический спектр элементарных магнитных возбуждений аморфного ФМ имеет "ротонный" характер (см. Квазичастица), т. е. существует минимум энергии при значении волнового числа, определяемом характерным размером неоднородности структуры. Низкотемпературная "магнитная" часть теплоемкости некоторых редкоземельных аморфных магнетиков линейно зависит от температуры. При идеальной изотропии аморфного вещества макроскопическая магнитная анизотропия в нем отсутствует. Однако локальная магнитная анизотропия, возникающая, например, от анизотропии локального внутрикристаллического поля, оказывает важное влияние на магнитные свойства аморфного магнетика. Так, коэрцитивная сила аморфного ФМ увеличивается очень резко, когда энергия одноионной локальной анизотропии становится сравнимой с энергией обменного взаимодействия. Это явление используют для создания магнитно-жестких аморфных магнетиков. Реальные аморфные магнетики не являются макроскопически изотропными из-за различных, главным образом технологических, причин и обычно обладают макроскопической магнитной анизотропией.

| Сравнение магнитных свойств некоторых кристаллических и аморфных сплавов (300 К) |                        |                             |                 |                                     |                              |
|----------------------------------------------------------------------------------|------------------------|-----------------------------|-----------------|-------------------------------------|------------------------------|
| Сплавы                                                                           | Состав                 | Магнитная<br>индукция<br>Тл | Точка<br>Кюри С | Коэрцитивная<br>сила $H_c$ ,<br>А/м | Магнитострикция<br>насыщения |
| Кристаллические                                                                  | $Ni(80\%)Fe(16\%)Mo$   | 0,78                        | 460             | 2                                   | ~0                           |
|                                                                                  | (4%)                   | 0,82                        | 400             | 0,4                                 | ~0                           |
|                                                                                  | $Ni(80\%)Fe(20\%)$     | 1,60                        | 480             | 8                                   | 40                           |
|                                                                                  | $Ni(50\%)Fe(50\%)$     | 2,03                        | 730             | 40                                  | 4                            |
|                                                                                  | $Fe(96,8\%)Si(3,3\%)$  |                             |                 |                                     |                              |
| Аморфные                                                                         | $Fe_{20}Co_{72}P_{16}$ | 0,63                        | 260             | 1,2                                 | ~0                           |
|                                                                                  | $B_6 A_{12}$           | 1,36                        | 344             | 8                                   | 26                           |
|                                                                                  | $Fe_{80}P_{14} B_6$    | 1,49                        | 292             | 4                                   | 30                           |
|                                                                                  | $Fe_{80}P_{16}C_3 B_1$ | 1,60                        | 374             | 3,2                                 | 30                           |
|                                                                                  | $Fe_{80}B_{20}$        |                             |                 |                                     |                              |

В аморфных ФМ и ФИМ наблюдаются различные типы доменных структур, включая цилиндрические магнитные домены. Магнитострикции аморфных ФМ и их кристаллических аналогов сравнимы.

Методы получения аморфных магнетиков основываются на том или ином способе фиксации неупорядоченного атомного состояния вещества. Наибольшее распространение получили методы закалки расплавов со скоростями  $10^4$ – $10^6$  К/с. Например, для получения аморфных металлических ферромагнитных лент и нитей используют метод "спиннингования" расплава на вращающийся металлический барабан (рис. 5.8.2, а) либо метод "экстракции" — выбрасывания расплава вращающимся диском (рис. 5.8.2, б). Для получения аморфных порошков вещество распыляют электрическим полем, взрывной волной и т. п. Массивные аморфные магнетики формируют из порошков методом прессования или взрыва. Используют также метод ионно-плазменного напыления. В тонкопленочном виде аморфные магнетики получают методами конденсации паров на охлажденную подложку, электро- и химического осаждения, ионно-плазменного напыления, ионной имплантации и др.

Перспективность технологического использования аморфных магнетиков из металлических стекол связана с относительной простотой их получения, высокой магнитной проницаемостью ( $\sim 10^6$ ), малыми магнитными потерями (0,5 Вт/кг), высокой антикоррозийной стойкостью, относительно большим электрическим сопротивлением, возможностью получения магнитно-жестких материалов с большой магнитной энергией. Недостатки аморфных магнетиков обусловлены принципиальной нестабильностью аморфного состояния. Со временем происходят перестройка атомной структуры аморфного магнетика и соответствующие изменения магнитных свойств. Кроме того, введение аморфизирующих добавок (неметаллов) снижает намагниченность аморфного магнетика, а снижение температуры магнитного фазового перехода делает их менее термостабильными. Магнитно-мягкие аморфные магнетики получают на основе сплавов  $3d$ -металл — неметалл [см. табл., типичный пример — метгласс (металлическое стекло)  $Fe_{80}B_{20}I$ ]. В качестве магнитно-жестких материалов используют сплавы  $3d$ - и  $4f$ -металлов, напр.  $TbFe_2$ . Аморфные магнетики применяют для создания трансформаторов, магнитных экранов, постоянных магнитов, головок магнитофонов, систем магнитной памяти и других устройств электро- и радиотехники.

## 5.9. Современное состояние производства магнитных материалов

### 5.9.1. Краткая историческая справка

В двадцатом столетии первый технологический рывок в синтезе магнитных материалов, произошедший в 1921 г. был связан с производством кобальтохромовой стали. Последующие исследования сплавов никеля, алюминия, меди и платины привели в 1935 г. к появлению новых магнитных материалов — так называемых альнико ( $Al-Ni-Co$  — алюминий, никель, кобальт) и кунифе

(*Cu-Ni-Fe* — медь, никель, железо), а также платинокобальтового сплава (1936 г.). Впоследствии свойства магнитов типа альнико были усовершенствованы и был получен материал с ориентированными доменами — альнико V, который широко используется и по сей день. Первые неметаллические магниты - ферриты - - были синтезированы исследователями из корпорации Philips в 1950-х годах. Эти материалы имели в своем составе стронциевый или бариевый ферриты, а также оксид железа. Ферритовые магниты получили широкое распространение (приблизительные оценки показывают, что на ферриты сейчас приходится около 80 % мирового производства магнитных материалов).

В 1970-х и 1980-х годах на основе редкоземельных элементов (самарий и неодим) были получены материалы, обладавшие улучшенными магнитными свойствами, так называемые редкоземельные магниты. Применение редкоземельных магнитов позволило сделать устройства, использующие постоянные магниты более миниатюрными и мощными.

Рассмотрим преимущества и недостатки указанных видов магнитных материалов. К основным преимуществам материалов альнико можно отнести высокую механическую прочность, стабильность магнитных свойств в широкой области температур, высокие значения намагничённости насыщения, однако магниты альнико обладают низким значением коэрцитивной силы. Ферритовые магнитные материалы отличаются высоким значением коэрцитивной силы, к недостаткам же их следует отнести механическую хрупкость, сложность в обработке, сильную зависимость магнитных свойств от температуры. Рассмотрим более подробно свойства редкоземельных магнитов, а также их достоинства и недостатки по сравнению с другими типами магнитных материалов.

Редкоземельные магниты, приготовленные на основе сплава *Sm-Co*, обладают хорошими магнитными характеристиками (высокие значения намагничённости насыщения, коэрцитивной силы), термической стабильностью, а также устойчивостью по отношению к процессам коррозии. Основным недостатком этого типа магнитов — высокая цена на *Sm* и *Co*, из-за которой широкое применение *Sm-Co* магнитов в настоящее время затруднено. Тем не менее, магнитные материалы на основе *Sm-Co* применяются в жестких дисках компьютеров и электрических моторах постоянного тока (в том случае, если стабильность свойств по температуре имеет большое значение, в частности в изделиях космической и оборонной промышленности). В настоящее время предпринимается попытка заменить *Co* на *Fe*. Ведутся работы по разработке постоянных магнитов на базе составов  $Sm_2Fe_{17}$  с добавлением азота и углерода.

Наиболее перспективными в настоящее время представляются спеченные магниты *Nd-Fe-B*. Отметим их основные преимущества. Во-первых, достигнутое значение энергетического произведения  $BH_{max}$  у магнитов *Nd-Fe-B* — наибольшее из всех известных материалов (до 50 МГсЭ и выше), однако это ещё не предел — из теоретических вычислений следует, что для этого материала максимально возможное значение  $(BH)_{max} = 64$  МГсЭ. Во-вторых, они

характеризуются высокой температурой Кюри Т<sub>С</sub>, составляющей около 160-170°С для марок с рабочей температурой 80°С. Однако, в настоящее время выпускаются марки *Nd-Fe-B* с рабочей температурой даже до 200°С, что открывает широкую перспективу их применения в электромоторах, использующих постоянные магниты. Одним из важнейших и по сути дела определяющих в экономическом плане достоинств *Nd-Fe-B* является его относительно низкая цена по сравнению с другими типами магнитных материалов (см. табл.1).

Таблица 1.

**Основные характеристики наиболее известных магнитных материалов**

| Материал                    | $(BH)_{max}$ ,<br>МГс*Э | $Br, Гс$ | $H_c Э$ | Цена, \$ за 1 кг<br>на Российском<br>рынке | Цена,<br>\$ на<br>единицу |
|-----------------------------|-------------------------|----------|---------|--------------------------------------------|---------------------------|
| Гибкие магнитные материалы  | 1.6                     | 1725     | 1325    | 5-10                                       | 3.1-6.2                   |
| Керамика                    | 3                       | 4000     | 2400    | 1-2.5                                      | 0.3-0.85                  |
| Альнико                     | 9                       | 13500    | 1400    | 44.1                                       | 4.3                       |
| <i>Sm-Co</i>                | 20                      | 10500    | 9200    | 250-500                                    | 12.5                      |
| Спеченные<br><i>Nd-Fe-D</i> | 50                      | 14200    | 12500   | 70-150                                     | 1.4-3.7                   |

Обсудим последний фактор подробнее. Как уже говорилось, появление магнитов *Sm-Co* было настоящим научным достижением в области постоянных магнитных материалов, но они все же не смогли выдержать конкуренции и уступили место ферритам и альнико из-за высокой стоимости. Как известно, чтобы промышленность начала выпускать новый продукт, он должен превосходить своих предшественников по целому ряду параметров, и цена — один из первых в этом ряду. В этом отношении спеченные *Nd-Fe-B* выгодно отличаются от магнитов из *Sm-Co* — они относительно недороги по сравнению с ферритами и альнико. В настоящее время во многих лабораториях мира осуществляется поиск новых, более дешевых методов изготовления спеченных магнитов *Nd-Fe-B*, так что цена на них постоянно снижается. На аналогичных соображениях основаны прогнозы аналитиков о росте продаж на мировом рынке спеченных магнитов *Nd-Fe-B* в текущем году на 4 % по сравнению с продажами в прошлом году на фоне снижения продаж ферритов и альнико на 1-2% по сравнению с прошлым годом.

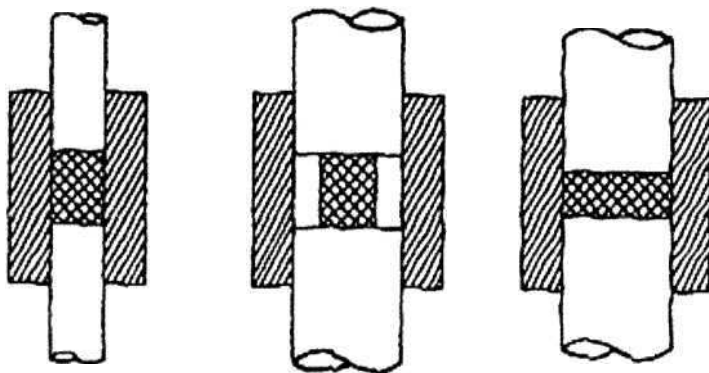


Рис. 5.9.1. Изготовление высокоанизотропных спеченных магнитов  $Nd-Fe-B$

К недостаткам материала относятся частичная потеря его магнитных свойств при эксплуатации при температурах выше  $150-200^{\circ}\text{C}$  (в зависимости от марки), несмотря на довольно высокую точку Кюри, а также его подверженность коррозии.

### 5.9.2. Получение спеченных магнитов $Nd-Fe-B$

В настоящее время ведется активный поиск наиболее эффективного состава для магнитного материала на основе сплава  $Nd-Fe-B$  и уже известно довольно много модификаций магнитов этого типа с добавлением  $Dy$ ,  $Al$  и ряда других химических элементов. Основным методом получения порошка  $Nd-Fe-B$  является восстановительная диффузная химическая реакция. Реакция должна осуществляться в вакууме во избежание окисления сильноактивных металлов. Затем полученные слитки дробят (как правило это многоступенчатый процесс) а измельченный порошок  $Nd-Fe-B$  прессуют в постоянном магнитном поле так чтобы ориентировать магнитные моменты зёрен в образце в одном направлении. После этого полученные образцы спекают до окончательного уплотнения. Для получения материала с повышенной анизотропией его необходимо подвергнуть дополнительной обработке. А именно, полученный по описанному выше способу образец (рис. 5.9.1, а) помещают в специальный пресс (рис. 5.9.1, б) и прессуют под нагревом (рис. 5.9.1, в), при этом высота образца уменьшается примерно на 50%. Механизм упорядочения при таком прессовании (и последующем быстром охлаждении) имеет кристаллографический характер, поэтому наличия внешнего поля не требуется. После такой обработки материал будет иметь большее значение намагнитченности насыщения, что приведет к росту магнитной энергии  $(BH)_{max}$ .

Одной из самых трудных стадий при изготовлении спеченных магнитов  $Nd-Fe-B$  является процесс изготовления порошка с частицами размером 5-10

мкм из вещества, полученного в результате химической реакции. Во время этой операции в материал могут попасть кислород и водород, которые очень хорошо поглощаются и приводят к заметному снижению магнитных и механических характеристик магнитов. Для предотвращения попадания в материал нежелательных веществ синтез и первичную обработку проводят в вакууме.

### **5.9.3. Перспективы развития современных магнитных технологий в России**

Коротко рассмотрим основные тенденции в развитии магнитных технологий, которые, на наш взгляд, в долгосрочной перспективе будут доминировать в отечественном высокотехнологичном производстве.

Начнем с одной из важных и имеющих потенциал роста отрасли хозяйства — автомобилестроения. В настоящее время одной из проблем отечественного автомобилестроения является относительно слабое внедрение в производство новых технологий и материалов. Мы считаем, что одним из приоритетных направлений в решении этой задачи является использование в производстве современных магнитных материалов и технологий. В первую очередь это связано с тем, что каждое современное транспортное средство имеет от 50 до 100 электромагнитных устройств (до 30 электродвигателей, исполнительные электромагнитные устройства, магнитные датчики и т.п.), использующих магнитные материалы. Именно эти устройства во многом определяют функциональность, степень управляемости, экономичность, комфорт и многие другие параметры машины. Во-вторых, общая тенденция в автомобилестроении — переход от 2 кВт к 20-50 кВт платформам, допускающим использование новых мощных устройств в управляющем и контрольном оборудовании автомобиля. Именно поэтому мировые производители близки к переходу на двухуровневое напряжение (14 и 42 В или 12 и 36 В). Дальнейшее увеличение мощности и эффективности электрооборудования автомобилей невозможно без применения новых магнитных материалов и новых конструкций электромагнитных устройств (например, комбинированного стартера, генератора и т.д.)

Так, по оценкам компании Toyota, использование известных уже более 50 лет ферритов вряд ли превысит 2 кг на одну машину (1.6 кг. в настоящее время). В то же время уже сейчас недавно вышедшие на рынок машины, такие как Honda Inside, используют несколько килограммов высокоэффективных постоянных магнитов *Nd-Fe-B*. Использование магнитов *Nd-Fe-B* в электромоторах и генераторах в Японии возросло в пять раз за последние несколько лет. Поскольку в российском автомобилестроении применялись и применяются в основном ферритовые магниты для электродвигателей различного применения и литые магниты типа ЮНД (альни) — для улавливания примесей в масле, то на повестку дня встаёт вопрос о тщательном анализе возможности исполь-

зования новых магнитных материалов и технологии в отечественном автомобилестроении.

## Литература:

*Rollin J. Parker*, Advances in Permanent Magnetism, Wiley, 1989

*Peter Campbell*, Permanent Magnet Materials and Their Application, Cambridge Univ Press, 1994

### 5.10. Редкоземельные постоянные магниты

#### Главное преимущество

Главное преимущество магнитов  $Nd-Fe-B$  (неодим-железо-бор) и  $SmCo$  (самарий кобальт) по сравнению с традиционно используемыми ферритами, альнико и др. материалами — **высокие магнитные свойства при существенно меньших размерах и весе**. Т.е. механические усилия, которые могут создаваться постоянными магнитами уже не являются силами игрушечными или приборными, а вполне соответствуют усилиям, характерным для обычных машин и механизмов, т.е. — десятки и сотни килограмм. Магнит  $Nd-Fe-B$  массой 1 г поднимает груз  $Fe$  массой 1000 г.

**Спрос со стороны российских предприятий на магниты  $Nd-Fe-B$  (неодим-железо-бор) растет ежегодно на 25-30%.**

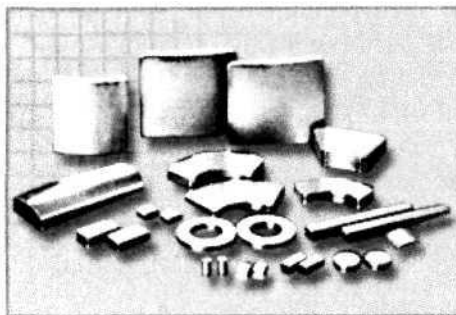


Рис. 1

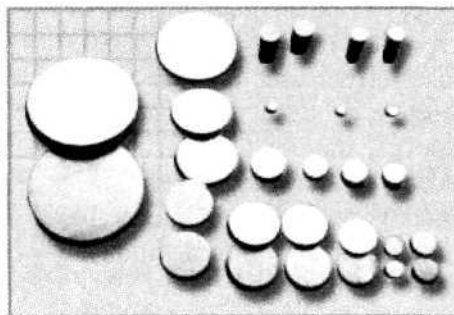


Рис. 3

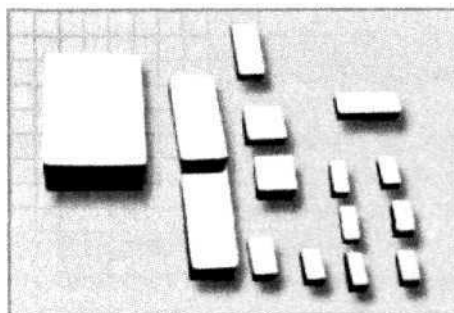


Рис. 2

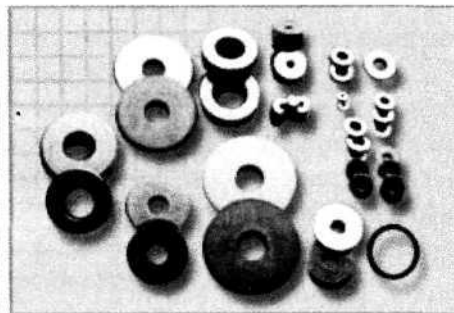


Рис. 4



Магнитная энергия самариевых магнитов в 6 раз выше, а неодимовых в 10 раз выше, чем у привычных нам ферритовых( керамических) изделий.

Магниты нового типа при сохранении своих размеров становятся значительно сильнее. Т.е. пропорционально увеличению величины магнитной индукции возрастает крутящий момент или тяговое усилие. Или же, при сохранении мощности устройства соответственно уменьшаются его габариты и вес. В некоторых случаях, применение мощных магнитов позволяет существенно снизить расход электроэнергии.

Сферы применения магнитов ООО "Эрга":

- серийные производства оборонной промышленности;
- автомобильная промышленность (датчики, электродвигатели, генераторы, стартеры и др. изделия);
- акустическая, теле- и радиоаппаратура
- область вычислительной техники, измерительные приборы, магнитные медицинские устройства;
- спец. техника (тралы, подъемные системы). Магнетронные устройства, динамические малогабаритные громкоговорители, магнитные муфты, датчики перемещения, электромеханические приборы;
- мототехника.

Технология

Слитки магнитных сплавов с заданными свойствами получают прямым сплавлением исходных компонентов в вакуумной индукционной печи в инертной атмосфере. Слитки подвергают дроблению и размалывают на шаровых мельницах. Размер частиц порошка обычно составляет около 1-3 мкм.

Из полученного порошка прессуются изделия в пресс-формах методами изостатического или линейного прессования в магнитном поле. Полученные заготовки спекаются при температурах 1000-1200°С. После спекания изделия проходят механическую обработку-шлифовку. Итоговая операция — отжиг с целью повышения коэрцитивной силы материала. На готовые изделия могут быть нанесены антикоррозионные покрытия по стандартной технологии.

Характеристики:

Спеченные постоянные магниты на основе сплава *Nd-Fe-B*

Сплав *Nd-Fe-B* (в табл. Е-28,30,33,38,42) стал коммерчески доступен с 1984 года. Отличается мощнейшими энергетическими показателями: остаточной индукции (до 1,35 Т) и значением энергетического произведения,  $BH_{max}$  - наибольшее из всех известных материалов (до 320 кДж/м<sup>3</sup> и выше). Плотность спеченных магнитов — до 7,4 г/см<sup>3</sup>. Температурный коэффициент обратимых изменений индукции в диапазоне рабочих температур — не более 5%. Температурный коэффициент необратимых потерь индукции в диапазоне рабочих температур — 0,12%/град. Точка Кюри 420 °С.

Определяющим в экономическом плане из достоинств *Nd-Fe-B* является оптимальное соотношение цены и качества.

| Магнитные свойства                                | E-28    | E-30     | E-33      | E-38     | E-42      |
|---------------------------------------------------|---------|----------|-----------|----------|-----------|
| Остаточная индукция, $Br(T)$                      | 1,0-1,1 | 1,1-1,16 | 1,15-1,2  | 1,2-1,28 | 1,28-1,35 |
| Коэрцитивная сила, $H_c$ , (кА/м)                 | 640-960 | 960-1280 | 1440-2000 | 960-1280 | 500-1000  |
| Эн.произвел. $(BH)_{max}$ , (кДж/м <sup>3</sup> ) | 200-240 | 240-256  | 256-288   | 288-320  | 320-350   |
| Мах рабочая температура, (°C)                     | 100     | 120      | 150       | 100      | 100       |

Спеченные постоянные магниты на основе сплава *SmCo*

| Магнитные свойства                                | <i>ES-1</i> | <i>ES-2</i> |
|---------------------------------------------------|-------------|-------------|
| Остаточная индукция, $Br(T)$                      | $\leq 0,82$ | $\leq 0,72$ |
| Коэрцитивная сила, $H_c$ , (кА/м)                 | 1200        | 1200        |
| Эн.произвел. $(BH)_{max}$ , (кДж/м <sup>3</sup> ) | 120         | 110         |
| Мах рабочая температура, (°C)                     | 180         | 180         |

Сплав *SmCo* ( в табл. *ES-1*, *ES-2*) стал доступен для широкого использования в 1970-ых годах. На сегодняшний день, обладает комбинацией чрезвычайно высоких магнитных свойств: высокие значения намагниченности насыщения, коэрцитивной силы, высокая термическая стабильность (до 200°C) и устойчивость по отношению к процессам коррозии. Плотность спеченных магнитов — до 8,5 г/см<sup>3</sup>. Точка Кюри 700°C.

Эти характеристики делают *SmCo* идеальным материалом там, где требуется магнит для работы в высоких температурных режимах или в коррозионной окружающей среде.

## 5.11. Получение и применение полимерных магнитов

Полимерные магниты появились в пятидесятых годах и, несмотря на очевидные преимущества, имели ограниченное применение, так их магнитные свойства были невысоки. Получают такие магниты, называемые также *магнитопластами* или, в зависимости от типа полимерного связующего, *магнитоэластиками*, из композиционных материалов, содержащих магнитный наполни-

тель (магнитный порошок) и полимерное связующее. Низкие магнитные свойства полимерных магнитов первого поколения были связаны с тем, что магнитный наполнитель, используемый для их получения, требовал дополнительной высокотемпературной обработки изделий, (так называемой "вторичной ферритизации"). Невозможность такой операции для магнитов на полимерном связующем существенно снижали их магнитные характеристики.

Появление второго поколения полимерных магнитов связано с разработкой технологии получения магнитных наполнителей, высокотемпературного обжига изделий не требующей. Как следствие, производство магнитопластов и магнитоэластов стало развиваться опережающими темпами.

В отличие от традиционных магнитов, изделия из них легко обрабатываются, обладают высокой ударной прочностью, могут быть гибкими, эластичными. Только из таких материалов могут быть изготовлены магнитные профили с сечением сложной конфигурации, листовые магниты. Несомненное достоинство полимерных магнитов — возможность получения изделий высокопроизводительными методами, характерными для переработки пластмасс — литьём под давлением, экструзией, каландрованием. Благодаря этому их производство более экономично по сравнению с обычными керамическими или металлическими магнитами. Можно также отметить коррозионную устойчивость, возможность получать изделия сложной формы, например, типа зубчатых колес, изделия с резьбовыми отверстиями и т.д. При этом изделия отличаются высокой точностью и стабильностью размеров и магнитных параметров и не требуют дополнительной обработки.

В соответствии с типом магнитного наполнителя композиционные магнитные полимерные материалы делятся на магнитотвердые (КМТПМ) и магнитомягкие (КММПМ).

Наполнители для КМТПМ (постоянных магнитов) — порошки из бариевого или стронциевого ферритов, сплавов на основе редкоземельных элементов (неодим-железо-бор, самарий-кобальт, самарий-железо, алнико); используются также смеси этих материалов. Для магнитомягких магнитных материалов применяют карбонильное железо, никель-цинковые и другие ферриты.

Изделия из магнитомягких материалов используются в СВЧ приборах, в качестве компонентов электронной техники, для защиты от разного типа излучений, поглотителей и т.п.

Наибольшее распространение получили полимерные композиционные магнитотвердые материалы (КМТПМ), к которым, как правило, и применяют термин *магнитопласты*. Для КМТПМ на эластичном связующем используют также термин *магнитоэласты* или *магнитные резины* (наиболее известная область применения последних — магнитные вставки уплотнителей холодильников).

Дальнейший прогресс в производстве полимерных магнитов связан с появлением так называемых *анизотропных магнитопластов*. (Полимерные магниты третьего поколения). В таких материалах повышение магнитных свойств обеспечивается созданием анизотропной текстуры. Изменение магнитных

параметров изделий связано, прежде всего, с ориентацией наполнителя в процессе переработки. Ориентация наполнителя обеспечивается наложением внешнего магнитного поля на композиционный материал, находящийся в вязко-текучем состоянии (магнитное текстурирование). Уровень магнитных свойств анизотропных изделий выше, чем у изотропных в 2-3 раза. Однако и для таких магнитов характерны более низкие по сравнению с цельными магнитами магнитные свойства; в целом ряде случаев требуются более высокие значения показателя *магнитные свойства / цена изделия*.

Появление магнитотвердых полимерных магнитов следующего, четвертого поколения, связано с, прежде всего, с решением проблем реологии полимерных магнитов в магнитном поле. Наличие сдвигового течения композиции в формирующем инструменте приводит к тому, что частицы магнитного наполнителя, ориентируемые магнитным полем в нужном направлении, разориентируются, вращаясь под действием приложенного напряжения сдвига. Магнитные свойства изделий получаются вследствие этого заниженными по сравнению с теоретически возможными. По этой же причине анизотропные полимерные магниты, производимые непрерывным способом — экструзией и каландрованием, имеют более низкие магнитные свойства по сравнению, например, с изделиями, полученными методами литья или прессования в магнитном поле. Указанные обстоятельства характерны для всех ведущих производителей полимерных магнитов мира. Отметим, что именно погонажные изделия (профили различного сечения, трубы) получаемые экструзией и листовые материалы (экструзионно — каландровый метод) представляют наибольшую практическую ценность. Такие изделия невозможно получить иначе, чем на основе КМТПМ, поэтому повышение магнитных свойств в данном случае особенно актуально.

*Нейтрализация негативного влияния неизбежного при переработке магнитопластов и магнитоэластов сдвигового течения, и более того — получение позитивного эффекта от механической ориентации при течении КМТПМ в магнитном поле потребовала решения двух задач.*

Во-первых, нетривиального решения конструктивного оформления формирующего инструмента, во-вторых, специальной подготовки и обработки магнитного наполнителя.

В последнем случае частицы наполнителя должны обладать анизометричной формой (игольчатой или пластинчатой), а направление оси легкого намагничивания частицы должно быть однозначно связано с ее формой.

Только при таком подходе появилась возможность избежать негативного для формирования анизотропной структуры сдвигового течения и сформировать в месте действия магнитного поля только течения растяжения — сжатия. Изометричные частицы наполнителя, окруженные жидкой фазой полимера, перемещаясь во внешнем магнитном поле, свободно разворачивались в заданном направлении, сохраняя полученную ориентацию в готовом изделии. Анизометричные частицы, если их форма и направление оси легкого намагничи-

вания было взаимосвязано, получали дополнительно механическую ориентацию.

Для максимального эффекта магнитный и механический методы ориентации должны быть реализованы в комбинации - в наиболее рациональных технических решениях уровень магнитных свойств анизотропных изделий при этом выше, чем у изотропных в 3-3,5 раза. В идеальном случае предельные магнитные свойства данного магнитотвердого материала могут быть достигнуты при точной ориентации вектора намагниченности в данной точке в заданном направлении, поэтому для получения изделий с высокими магнитными свойствами важны все стадии техпроцесса.

*1. Получение и обработка наполнителя.* Поскольку лучшими магнитными свойствами обладают магнитопласты, состоящие из однодоменных ферритовых частиц, технологический процесс включает необходимые для ферритизации операции отжига; операции размола наполнителя в шаровых и вибромельницах с использованием технологических добавок, обеспечивающих необходимый гранулометрический состав и другие требования к наполнителю; просеивания, и т.д.. Для получения наиболее высоких магнитных свойств порошки подвергаются химической обработке с целью удаления немагнитной фракции (ферритовой пыли) и сфероллитизации частиц наполнителя.

*2. Приготовление композиции.* С точки зрения реологического поведения магнитопластов в процессе переработки большое значение имеют как макро-реологические свойства (возможность переработки на современном высокопроизводительном оборудовании), так и микро-реологические эффекты, связанные с условиями вращения частиц наполнителя в полимерной матрице.

Поэтому в состав композиции вводят технологические добавки, подбор которых определяется природой полимера и наполнителя.

Существенным технологическим приемом, обеспечивающим улучшение реологических свойств композиций, является приготовление составов на основе смесей порошков с размерами частиц, обеспечивающими максимальный коэффициент объемного заполнения. При этом концентрацию наполнителя можно повысить до 91-94 % масс. (65-70% объемных) без снижения степени ориентации наполнителя. Для получения композиционных магнитотвердых материалов в промышленных объемах требуются специальные смесители тяжелого типа, способные осуществлять равномерное смешение с объемным коэффициентом заполнения 0,6 к тому же выполненным из абразивностойких материалов.

*3. Получение изделий.* В процессе экструзии нагретая смесь исходных компонентов продавливается через головку с профилирующим каналом заданной формы. В результате получают магнитные полимерные профили нужного сечения. Условия для магнитной ориентации обеспечиваются наложением внешнего магнитного поля на материал, находящийся в вязкотекучем состоянии. Механический ориентационный эффект достигается за счет соответствующего конструктивного оформления формующего инструмента

Переработка магнитопластов литьем под давлением осуществляется на оборудовании, с устройствами наложения магнитного поля на формируемые изделия.

Листовые изделия производятся на экструзионно — или валково-каландровых линиях с последующим намагничиванием. В дальнейшем лист может быть разрезан на полосы нужной ширины.

В качестве связующего используются самые разные полимеры, обеспечивающие требуемые эксплуатационные характеристики. Для листовых материалов, получаемых методом каландрования, это, как правило, различные виды термоэластопластов, пластифицированный поливинилхлорид, сульфохлорированный полиэтилен, нитрильный и другие каучуки. Для экструзии и литья под давлением используют полиамиды, полистиролы, полиолефины, сэвилен и другие виды термопластов с достаточной текучестью. При получении изделий из магнитопластов методом прессования используют термореактивные связующие: эпоксидные фенольные, полиэфирные смолы.

Необходимо отметить, что эластичные полимерные связующие, отличающиеся, как правило, большей вязкостью, менее удобны для достижения ориентации наполнителя в магнитном поле. Жесткие магнитопласты характеризуются, поэтому более высокими, чем у гибких магнитов, значениями коэрцитивной силы  $H_{ci}$ , остаточной индукции  $B_r$  и энергетического произведения  $(BH)_{max}$ . Типичные значения магнитных параметров полимерных магнитов даны в приводимой ниже таблице.

| Вид магнита, способ получения                                 | Магнитная компонента | $H_{ci}$ , Э | $B_r$ , Гс | $(BH)_{max}$ , МГсЭ |
|---------------------------------------------------------------|----------------------|--------------|------------|---------------------|
| Жёсткие магниты; литьё под давлением, экструзия, прессование. | Феррит               | 2700 - 5000  | 2100-2800  | 1.4-2.0             |
|                                                               | $Sm - Co$            | 16000        | 6100       | 8.5                 |
|                                                               | $NdFeB$              | 4300-16000   | 4900-7000  | 4.8-10.3            |
| Гибкие магниты; каландрование, экструзия                      | Феррит               | 2100-3600    | 2100-2700  | 1-1.8               |
|                                                               | $NdFeB$              | 10000        | 5300       | 6                   |

Некоторые области применения полимерных магнитов:

- Акустические системы, реле и бесконтактные датчики, электромашины, магнитные сепараторы, холодильники:



- магнитные элементы кодовых замков и охранной сигнализации;
- тахогенераторы, датчики положения, электроизмерительные приборы.
- медицина (магнитотерапия, магнитные матрасы);
- автоматизированное шоссе, где в США предусматривается разместить до полутонны ферритовых магнитопластов на одну милю шоссе для автоматического управления движением автомобиля, оснащенного специальным компьютером и системой слежения;
- магнитное покрытие для полов офисов и промышленных помещений;
- магнитная компонента для глушителей автомобилей (в Европе на эти цели уходит 23000 тонн магнитопластов);
- периферийные устройства компьютеров, мобильные телефоны, фотоаппараты, кинокамеры;
- магнитные устройства для обработки воды, углеводородного топлива, масел; магнитные фильтры;
- магниты для учебных заведений (магнитная азбука, символы и знаки на магнитной фиксации, наглядный и демонстрационный материал), магнитные фиксаторы разных типов; магнитные устройства для использования в рекламе, торговле, при оснащении выставок, конференций, спортивных мероприятий и т.д.

## **Магнитопласты**

Полимерные постоянные магниты или магнитопласты изготавливаются из смеси магнитного порошка и связующей полимерной компоненты. Этот вид магнитных материалов имеет существенные преимущества по сравнению с обычными металлическими или керамическими магнитами, получаемыми спеканием, среди которых можно отметить высокую воспроизводимость и стабильность магнитных свойств, большой срок службы, меньшие издержки при изготовлении, возможность получать изделия сложной формы с высокой точностью соблюдения заданных размеров, хорошую механическую прочность и пластичность; устойчивость к коррозии, меньший, чем у обычных магнитов, вес. Необходимо отметить, что технология полимерных магнитов даёт возможность достаточно легко создавать разнообразные сложные конфигурации магнитных полюсов.

Различают гибкие и жесткие (негибкие) полимерные магниты. В жестких полимерных магнитах в качестве полимерной связки используются реактопласты и термопласты. Первые затвердевают в результате происходящей в них химической реакции и, как правило, не могут в последствии быть размягчены воздействием повышенной температуры; в качестве примера можно привести эпоксидные смолы. Термопласты (термопластичные пластмассы) — это пластические массы, способные размягчаться при нагревании и затвердевать при охлаждении. Наиболее распространены термопласты на основе поливинилхлорида, полистирола, полиамида и т.д.

При изготовлении гибких полимерных магнитов используются термопласты и эластомеры. К эластомерам относятся полимеры и материалы на их основе, характеризующиеся высокоэластичными свойствами в рабочем диапазоне температур. Примерами эластомеров, применяемых при изготовлении гибких полимерных магнитов являются винил, нитриловая резина, хайпалон (сульфохлорированный полиэтилен).

Магнитные порошки в настоящее время изготавливаются из бариевого или стронциевого ферритов, сплавов на основе редкоземельных элементов (неодим-железо-бор, самарий-кобальт, самарий-железо), алнико; используются также смеси этих материалов. От того, какая магнитная компонента использована в данном продукте, зависят его магнитные характеристики.

Полимерные магниты изготавливаются литьём под давлением, экструзией, прессованием и каландрированием. На начальном этапе готовится исходная смесь, включающая в себя магнитный порошок, соответствующий полимерный материал, антиокислители и пластификаторы (при необходимости). Магнитный порошок может составлять до 78 % от полного объёма исходной смеси. В процессе экструзии нагретая смесь исходных компонентов продавливается через головку с профилирующим каналом заданной формы. В результате получают магнитные полимерные профили нужного сечения. Литье под давлением производится путем выдавливания нагретой смеси в заданную форму. При прессовании исходная смесь из магнитного порошка и эпоксидной смолы, помещенная в заданную форму, подвергается отверждению под действием механического одноосного напряжения, прикладываемого прессом. Следует отметить, что прессование позволяет получать полимерные магниты с более высоким содержанием магнитной компоненты, чем метод экструзии (78 объёмных процентов против 75). Каландрирование представляет собой многоступенчатую прокатку нагретой смеси исходных компонентов через систему металлических валиков круглого поперечного сечения. В результате получается гибкий полимерный магнитный лист, толщина которого определяется расстоянием между валиками, а ширина — их длиной. В дальнейшем лист может быть разрезан на полосы нужной ширины. Магнитные полимерные полосы могут быть также получены с помощью экструзии при использовании профилирующего канала прямоугольной формы. В качестве полимерной компоненты при каландрировании используются эластомеры, а при экструзии и литье под давлением — эластомеры и термопласты.

Жесткие магнитопласты характеризуются более высокими, чем у гибких магнитов, значениями внутренней коэрцитивной силы  $H_{ci}$ , остаточной индукции  $B_r$  и энергетического произведения  $(BH)_{max}$ . Типичные значения магнитных параметров полимерных магнитов даны в приводимой ниже таблице:



| Вид магнита, способ получения                     | Магнитная компонента | $H_{ci}, \text{Э}$ | $B_r, \text{Гс}$ | $(BH)_{\max}, \text{МГсЭ}$ |
|---------------------------------------------------|----------------------|--------------------|------------------|----------------------------|
| Жёсткие магниты; литьё под давлением, прессование | бариевый феррит      | 2700-5000          | 2100-2800        | 1.4-1.9                    |
|                                                   | $Sm - Co$            | 16000              | 6100             | 8.5                        |
|                                                   | $NdFeB$              | 4300-16000         | 4900-7000        | 4.8-10.3                   |
| Гибкие магниты; каландрирование, экструзия        | бариевый феррит      | 2100-3600          | 2100-2700        | 1-1.8                      |
|                                                   | $NdFeB$              | 10000              | 5300             | 6                          |

Магнитопласты находят широкое применение в электродвигателях, генераторах, различного рода исполнительных устройствах и сенсорах.

## Магнитная пена

Различного рода пены, как жидкие, так и твёрдые, находят широкое применение в промышленности и в повседневной жизни. Требования, предъявляемые к пене, зависят от ее технического назначения. Для решения ряда задач актуальным является воздействие на пену внешним магнитным полем. При этом появляется возможность её перемещения как в вертикальном, так и в горизонтальном направлениях без потери устойчивости. При том же составе и соотношении компонентов пены резко увеличиваются её сорбционные возможности, появляются радиопоглощающие свойства и т.п. Одной из задач, при решении которых магнитная пена может найти наиболее широкое применение является очистка, например, водной поверхности от загрязнения нефтепродуктами.

Проблема создания магнитной пены с высокой и контролируемой стабильностью заключается в том, что необходимо стабилизировать дисперсный магнитный носитель, имеющий высокие магнитные характеристики, непосредственно в стенках пенных пузырьков, толщина которых, как правило, не превышает 300 нм. Дисперсные материалы для которых размеры дисперсной фазы равны или больше указанной величины не могут удерживаться в пене достаточно долго. Кроме того, процедура введения дисперсных материалов в пены затруднена тем обстоятельством, что как известно, материалы с высоко-развитой поверхностью являются эффективным пеногасителям т.е. они активно разрушают пены.

В роли магнитных материалов вводимых в пену могут быть использованы частицы магнитных металлов, их сплавов а также других магнитных составов. Размер этих частиц должен быть в пределах от 1-2 до 30-100 нм (наночастицы). Наночастицы являют собой особое состояние материала, отличающееся тем, что доля поверхностных атомов сравнима с числом атомов внутри частицы.

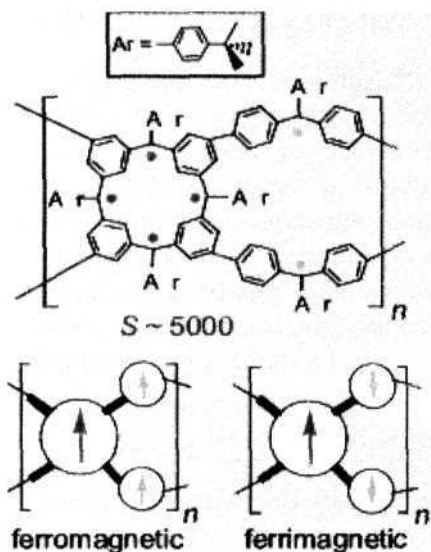
Это обуславливает значительную химическую активность таких частиц и их специфические физические свойства. В частности, наночастицы магнитных металлов и сплавов обладают высокой намагничённостью и магнитной анизотропией и в ряде случаев могут обладать большой коэрцитивной силой и сохранять магнитные свойства при высоких температурах. Методы создания таких частиц и их стабилизации хорошо известны.

Занимая промежуточное положение между молекулами и обычными дисперсными системами (с размером частиц от нескольких микрон до долей микрон), наночастицы могут легко стабилизироваться как в жидкой, так и в газовой фазах. Для их поддержания в этих фазах в качестве потенциальных лигандов используют вещества, являющиеся одновременно активными пенообразователями и стабилизаторами. Содержащие магнитные наночастицы пены в зависимости от природы жидкой фазы могут оставаться жидкими (жидкая магнитная пена) в течение нескольких минут или нескольких часов или затвердевать (твёрдая магнитная пена).

По своей структуре магнитные пены представляют собой ячеистые образования, в стенках которых присутствуют магнитные наночастицы, стабилизированные молекулами поверхностно активных веществ. В пену могут быть введены как магнитомягкие, так и магнитотвёрдые материалы. Для ввода в пену могут быть пригодны следующие материалы: переходные металлы (такие как *Fe*, *Co*, *Ni*), их сплавы и соединения различного состава, ферриты, в том числе легированные, редкоземельные металлы и их сплавы, магнитотвёрдые составы типа *Nd-Fe-B*, *Sm-Co*, *Sm-Fe* (например,  $Nd_2Fe_{14}B$ ,  $SmCo_5$ ,  $Sm_2Fe_{17}C_9$ ) в различных соотношениях. При действии внешнего магнитного поля магнитные моменты, находящихся в пене наночастиц ориентируются в направлении поля и благодаря этому пена притягивается к источнику магнитного поля.

Жидкая или твёрдая магнитная пена может быть использована для очистки

водной поверхности от гидрофобных загрязнений. При расположении источника магнитного поля у поверхности пена легко перемещается по ней в определяемую градиентом магнитного поля сторону, увлекая за собой все, что находится на поверхности или в ячейках пены. Если источник магнитного поля расположен над поверхностью раздела сред вода - воздух, то его магнитное поле может вызывать отрыв пены от поверхности и её "прилипание" к источнику поля вместе со своим содержимым. И в том, и в другом случае достигается отделение пены от очищаемой поверхности вместе с содержащимися в ней поглощаемыми компонентами и её последующее перемещение в



нужном направлении. Для освобождения от поглощенных вредных примесей магнитная пена может быть разрушена обычными методами. Дорогостоящие магнитные материалы могут быть выделены из образовавшегося продукта стандартными приемами магнитной сепарации. Десорбция из неразрушаемых твердых магнитных пен может быть проведена стандартными приемами промывки растворителями.

Можно отметить еще одно полезное свойство твердых магнитных пен. Являясь эффективными теплоизолирующими материалами твердые магнитные пены одновременно обладают радиопоглощающими свойствами в широком диапазоне частот (105 — 1012 Гц). Спектр поглощения может изменяться за счет подбора оптимального состава и размера наночастиц.

### Дебют магнитного полимера

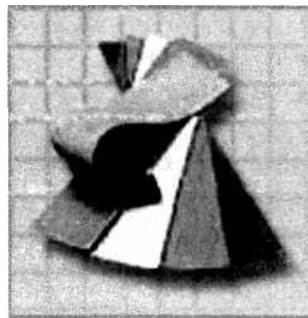
Прежде связываемые лишь с материалами, содержащими ионы металлов, однако недавно сильномагнитные свойства были обнаружены в чисто углеродном полимере. И вот теперь группа Анджея Райки (Andrezej Rajca) из университета штата Небраска разработала полимер, обладающий одновременно ферромагнитными и антиферромагнитными свойствами. Мало того, магнитная восприимчивость его на два порядка (в 100 раз) превосходит восприимчивость фуллеренового полимера, героя недавней научной сенсации (A Rajca et al 2001 Science 294 1503).

Звенья (мономеры) полимерной цепочки, созданной учеными в Небраске, содержат 14 бензольных колец. Электроны в бензольном кольце "коллективизируются" ("диссоциируют") и туннелируют между связанными состояниями кольца (атомами углерода), т.е. кольцо является связанной системой.

В каждом мономере бензольные кольца собраны в две группы (два "модуля"). Одна из них представляет собой кольцо (макроцикл) из восьми молекул бензола, а другая связывает оставшиеся шесть бензольных колец в двух ветвях, образующих связи с другими мономерами. Необычные магнитные свойства полимера объясняются тем, что электроны в разных "модулях" ведут себя по разному.

Коллективизированные (в указанном выше смысле) электроны могут перемещаться и между элементами макроцикла мономера, причем их спины *сильно связаны между собой*, что придает макроциклу большой магнитный момент. В "усах" мономера — наоборот, движение электронов затруднено, в результате чего магнитный момент модуля оказывается малым по величине.

При полимеризации эти большие и малые магнитные моменты чередуются в цепочке таким образом, что все магнитные моменты макроциклов на-

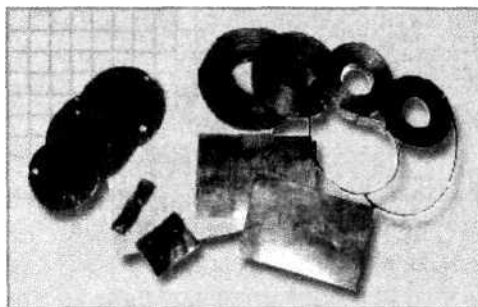


правлены "вверх", а слабые магнитные моменты "усов" могут быть направлены как "вверх", так и "вниз". В результате полимер обладает как ферромагнитными, так и антиферромагнитными свойствами.

Ввиду слабости связи между модулями, в полимере эти магнитные свойства наблюдаются только при температурах ниже 10 К. При более высоких температурах тепловые флуктуации разрушают эту связь.

По словам А.Райки, намагниченность насыщения этого полимера примерно в 20 раз уступает аналогичной величине для железа при комнатной температуре, однако на два порядка превосходит это значение для недавно открытого "ферромагнитного углерода".

Полимер, полученный группой А.Райки достаточно мягок (эластичен). Полимерные проводники уже сейчас применяются в качестве светодиодов в широкоэкранных дисплеях, отмечает он, однако исследователи, открывшие их двадцать лет назад не могли предсказать для них такого применения. "Важность нашего открытия состоит в том, что оно показывает возможность создания сложных органических полимеров, обладающих сильными магнитными свойствами," — сообщил он в интервью научному ресурсу PhysicsWeb.



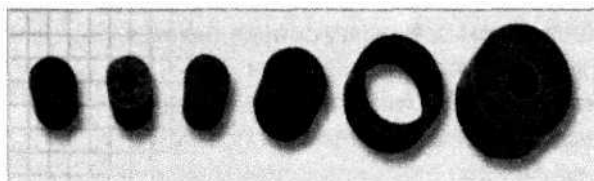
## Магнитный винил

### СФЕРЫ ПРИМЕНЕНИЯ МАГНИТНОГО ВИНИЛА:

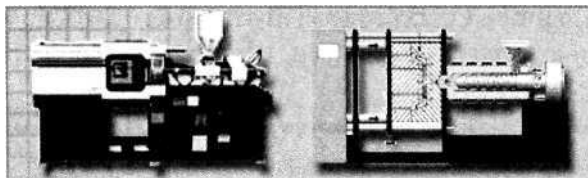
Реклама

Информационные технологии

Общеобразовательные цели



Предлагаем Вам материал — **магнитный винил**, для изготовления рекламной и сувенирной продукции (наклейки на холодильник, визитки, брелки, лейблы фирм, транзитная реклама на автотранспорте и др.); для изготовления наглядных учебных пособий и развивающих игр; для оформления выставок и мест продаж (информационные стенды, разного рода информационные знаки, панели, указатели и таблички, магнитные наклейки и стикеры). Приведенными примерами возможности винила в современных технологиях далеко не исчер-



пываются и при соответствующей фантазии, могут быть существенно расширены.

### Магнитный винил (ходовые размеры)\*

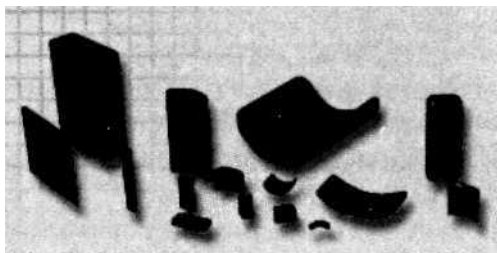
| Толщина магнитного винила | Покрытие | Длина рулона, м | Ширина рулона, м |
|---------------------------|----------|-----------------|------------------|
| 0.4mm                     | —        | 30              | 0,62             |
| 0.7mm                     | PVC      | 30              | 0,62             |
| 0.7mm                     | —        | 30              | 0,62             |
| 0.7mm                     | клей     | 30              | 0,62             |
| 1.5mm                     | —        | 15              | 0,62             |
| 1.5mm                     | клей     | 15              | 0,62             |
| 1.5mm                     | PVC      | 15              | 0,62             |

\*Толщины, свойства и дополнительные слои могут меняться по согласованию с заказчиком. Магнитный винил может поставляться как в рулонах, так и листах (600ммх450мм).

### ХАРАКТЕРИСТИКИ МАТЕРИАЛА:

**Магнитный винил** — пластичный материал на резиновой основе с магнитными свойствами, легко поддающийся резке, штамповке, обработке абразивными инструментами. Прочный на изгиб (можно без поломок обернуть вокруг стержня диаметром 5 мм). Температура обработки от -40 до +70°C. Удерживает на своей поверхности груз от 20 до 80 гр/см<sup>2</sup>.

Винил повышенной силы магнитного притяжения — анизотропный винил. Для его производства применяются специальные добавки и технологические режимы, благодаря которым он в 2 раза сильнее,



чем стандартный (изотропный) винил. Одна сторона листа может быть покрыта клеевым составом. Винил поставляется рулонами. Ширина рулона 620 мм. Длина рулона 30 метров.

*Магнитопласты — это постоянные магниты на полимерной основе, благодаря которой обладают недоступными для спеченных магнитов механическими и прочностными характеристиками (высокая воспроизводимость и стабильность магнитных свойств, большой срок службы, хорошая механическая прочность и пластичность). ООО "Эрга" принимает заказы на магнитопласты любых конфигураций. Технология их изготовления исключает механическую и термическую обработку, что позволяет добиваться максимальной точности в размерах. ООО "Эрга" производит магнитопласты на основе Nd-Fe-B и на основе Ферритов.*

**ТЕХНОЛОГИЯ:** Магнитная основа — порошок феррита стронция (бария), либо порошок состава неодим-железо-бор (Nd-Fe-B), обработанный водородом (HDDR-процесс) или полученный из аморфного состояния. Связующий полимер — полиамид, полипропилен и др. пластики. Изделия из магнитопластов изготавливаются методом литья на термопласт-автоматах в магнитном поле. Намагничивание изделий осуществляется в специальных устройствах, индивидуально разрабатываемых для каждого типа магнитов в соответствии с требуемой конфигурацией магнитного поля. Такая технология позволяет получать сравнительно дешевую конкурентоспособную продукцию, имеющую широкий рынок сбыта.

#### СФЕРЫ ПРИМЕНЕНИЯ

Магнитопласты находят применение в электродвигателях, генераторах, различного рода датчиках. Могут использоваться в акустических преобразователях, электроаппаратах, изделиях оргтехники, бытовой и специальной техники. К нетрадиционным сферам применения можно отнести производство рекламной продукции и развивающих игр для детей.

#### ХАРАКТЕРИСТИКИ: Магнитопласты на основе ферритов

| Магнитные свойства                          | ER — 1    |
|---------------------------------------------|-----------|
| Остаточная индукция, Вг(Т)                  | 0,2 — 0,3 |
| Коэрцитивная сила $H_c$ , (кА/м)            | 200-240   |
| Эн.произвед.(ВН)гаах, (кДж/м <sup>3</sup> ) | 16        |
| Мак рабочая температура, (°С)               | 150       |

Магнитопласт ER-1 — способен полностью заменить собой традиционно используемые ферритовые магниты. При сопоставимом уровне цен, обладает недоступными для обычных ферритов качествами: низкий вес магнитов (снижен почти в 3 раза); отсутствует хрупкость, что снижает брак в производстве; сохраняет прочность в агрессивной среде.

#### Магнитопласты на основе Nd-Fe-B

| Магнитные свойства                         | ER-2     | ER-3     |
|--------------------------------------------|----------|----------|
| Остаточная индукция, Вг(Т)                 | 0,4-0,5  | 0,5-0,7  |
| Коэрцитивная сила $H_c$ , (кА/м)           | 600-1200 | 600-1200 |
| Эн.произвед.(ВН)гах, (кДж/м <sup>3</sup> ) | 40-80    | 80-120   |
| Мак рабочая температура, (°С)              | 120      | 120      |

Магнитопласты ER-2 и ER-3 содержат в основе — порошок состава Nd-Fe-B (обработанный водородом) и связующий полимер — полиамид. Показатели  $B_r$ ,  $H_c$ , (ВН)мах в 2-5раз выше, чем у магнитопласта ER-1.

## Глава 6.

# ПРИМЕНЕНИЯ МАГНИТОВ И МАГНИТНОГО ПОЛЯ В ТЕХНИКЕ И ТЕХНОЛОГИЯХ

### 6.1. Выбор магнита для применения

При выборе материала для постоянного магнита перед инженером встают четыре основных вопроса.

Какие магнитные свойства материала необходимы?

Какие требования предъявляются к физическим свойствам материала?

Какие температуры предстоит выдержать магниту?

Какие требования предъявляются к стоимости магнита?

На сегодняшний день существует много материалов, используемых при изготовлении постоянных магнитов. Алюминик, ферриты (керамика), самарий кобальт, неодим железо бор, железо-хром-кобальт и материалы в виде смеси магнитного порошка и какой либо связующей компоненты. В качестве связующего материала могут выступать каучук, пластик и материалы на базе эпоксидной смолы.

Прежде чем приступить к обсуждению выбора подходящего материала, рассмотрим основные преимущества и недостатки каждого из вышеперечисленных материалов. Знание свойств материалов поможет в выборе материала магнита при любых требованиях.

### Магниты алюминико

Алюминико — один из старейших магнитных материалов, используемый ещё со времён второй Мировой Войны. Он имеет несколько положительных качеств по сравнению с другими материалами. У него может быть очень высокая остаточная намагниченность  $B_r$ , изменяющаяся от 6700 до 13500 Г. Температура Кюри (температура, при которой материал полностью теряет свои магнитные свойства) у этого материала примерно 840 °С, температурная стабильность данного материала очень высока. Температурный коэффициент индукции и других магнитных характеристик составляет 0.02 (% / °С), меньше чем у многих других доступных материалов.

Еще одно достоинство Алюминико — возможность формирования в материале магнитного поля большой кривизны. Одна из старейших форм Алюминико — форма подковы, искривлённый магнит с северным и южным полюсами, выровненными так, что они могут, например, поднимать стальной стержень.

Один из недостатков Альнико — определённая трудность использования в составе изделия. Альнико очень жесткий и хрупкий материал. Он может быть обработан только полированием, шлифованием или электроэрозионной обработкой.

У Альнико низкая коэрцитивная сила, изменяющаяся в пределах 0.64-1.9 кЭ.

### **Ферритовый магнит (керамика)**

Феррит — самый дешёвый магнитный материал. Известная нидерландская компания Phillips использует в своём производстве ферритовые магниты еще с конца 50-х годов. У этого материала умеренно высокие значения  $H_{cb}$  и  $H_{ci}$  (от 2,500 до 4,000 G), что значительно выше, чем у Альнико. Его электрическое сопротивление также очень высоко. Когда мы думаем о керамических материалах, мы думаем о диэлектриках, тогда как практически все магнитные материалы имеют умеренную электрическую проводимость. К недостаткам ферритовых материалов можно отнести умеренно низкую температуру Кюри (около 450 °C), а также низкую температурную стабильность. Температурный коэффициент ферритовых материалов составляет 0.2 (% / °C), т.е. они в 10 раз менее стабильно, чем Альнико (-0.02 (% / °C)). Ферритовые материалы давно применяются в производстве электродвигателей, где необходим магнитный материал с высокой коэрцитивной силой. В настоящее время ферриты стали широко применяться в автомобильных двигателях постоянного тока, стеклоподъёмниках, вентиляторах, антенных моторах и т.д.

Ферриты с успехом используются в тех случаях, когда необходимы относительно хорошие магнитные характеристики материала. Как уже отмечалось, коэрцитивная сила данного материала изменяется в пределах от 2,500 до 4,000 G, что вполне достаточно для электроприводов постоянного тока, применяемых в автомобилестроении. Электроприводы в автомобилестроении — основная поддержка магнитного бизнеса вот уже почти 40 лет. Главное же достоинство ферритов это их низкая цена. Не следует также забывать о высокой химической стабильности к окислению, позволяющей ферритам сохранять свои свойства и внешний вид без всякого покрытия в течение десятилетий.

Таким образом, ферриты применяются там, где основным требованием при выборе магнита является низкая цена. Вместе с этим, поскольку свойства ферритов постоянно совершенствуются, вполне возможно расширение ниши, занятой ими на рынке магнитных материалов.

### **Магниты самарий кобальт (*SmCo*)**

Материал самарий-кобальт (*SmCo*) впервые был использован в конце 70-х годов прошлого века в Дэйтонском университете в рамках одного из проектов ВВС США. Энергия магнитного поля этого материала оказалась значительно более высокой, чем у Альнико, а температурная стабильность — просто превосходной.



Как магниты *SmCo*, так и Альнико широко используются в оборонной промышленности. Ферритовые магниты не так часто применяются в этой области из-за их температурной нестабильности и низкой коэрцитивной силы при низких температурах.

Достоинства магнитов *SmCo* включают в себя высокие остаточную намагниченность *Br* (до 11.5 кГ), коэрцитивную силу *Hci* (от 5.5 до 25 кЭ) и высокую температуру Кюри. Существует две марки *SmCo*: 1:5 –сплав, у которого температура Кюри 750 °С, и 2:17 — сплав с температурой Кюри 825 °С. Магниты *SmCo* имеют очень хорошую температурную стабильность 0.035 (% / °С), их температурный коэффициент индукции чуть больше, чем у Альнико. Они также обладают достаточно высоким значением энергетического произведения (ВН)тах на единицу объёма ((ВН)тах изменяется в пределах от 16 до 30 МГ\*Э).

Недостатками магнитов *SmCo* являются их высокая стоимость и хрупкость. Это самый дорогой из имеющихся магнитных материалов. Высокая цена материала определяется использованием в нём дорогих редкоземельных металлов. В частности, технология очистки самария достаточно дорога, так же, как и кобальта, который широко используется в производстве сталей высоких марок.

Из двух сплавов — 1:5и2:17 — менее дорогим (на 10-15 %) является сплав 2:17, поскольку в нем небольшая часть используемого кобальта замещена железом, и содержание самария также меньше, чем в чистом сплаве 1:5. Выпуск магнитов из сплава 2:17 пока на 50 % выше, чем из сплава 1:5. Разработанные из сплава 2:17 магнитные системы имеют большую магнитную энергию, при этом сплав 2:17 производит ту же работу, что и сплав 1:5, и имеет меньшую стоимость. Второй существенный недостаток материала *SmCo* — это его хрупкость. Заказчикам обычно советуют иметь магниты *SmCo* с фасками радиусом скругления 0,004 дюйма.

Тем не менее, во многих военных разработках, где требуется стабильность и надёжность, а цена имеет второстепенное значение, магниты *SmCo* сменили Альнико.

### **Магниты неодим железо бор (*NdFeB*)**

Научные исследования нового магнитного материала — неодим-железо-бор (*NdFeB*) — начались с 80-х годов прошлого века, а его широкое применение в промышленности - - с 1984 года. Производители искали магнитный материал, который обладал бы такой же магнитной энергией, как *SmCo*, но имел существенно более низкую стоимость. Было установлено, что у сплавов *NdFeB* очень высокое энергетическое произведение - - вплоть до 50-55 МГ\*Ое- при значительно меньшей цене, чем цена *SmCo*.

Магниты *NdFeB* имеют широкий диапазон рабочих температур (от -40 °С до +150 °С), некоторые их виды можно использовать вплоть до 200°С, однако,

они имеют пониженные значения магнитных характеристик по сравнению с остальными марками.

Магниты *NdFeB* имеют меньшую температурную стабильность, чем магниты *SmCo* — их температурный коэффициент магнитной индукции изменяется от 0.07 до 0.13 (% / °C) (сравните с 0.035 (% / °C) у *SmCo*). Вследствие этого при температурах более 180 °C магниты *SmCo* могут создавать большие значения магнитного поля, чем магниты *NdFeB*.

Материал *NdFeB* очень сильно подвержен коррозии, поэтому его покрывают цинком, никелем, медью или комбинацией этих материалов. Кроме того, во избежание возникновения химически нестабильных соединений в структуре сплава процесс изготовления проводится в отсутствие воздуха.

*NdFeB* имеет низкую температуру Кюри -- примерно 310 °C, которая может быть повышена добавлением кобальта. Однако, как отмечалось ранее, использование кобальта вместо железа ведет к удорожанию материала.

В настоящее время магниты *NdFeB* очень широко используются в двигателях электроприводов в компьютерной технике благодаря своим высоким энергетическим магнитным характеристикам. Ранее (в 80-х годах прошлого века) для этих целей использовались ферритовые магниты, позже — магниты из *SmCo*. Использование наиболее сильных магнитов позволяет сделать привод диска более миниатюрным. На сегодняшний день в приводах жестких дисков используется *NdFeB*. Устройства считывания и записи информации (так называемые VCM, а также все дисковые и шпиндельные моторы используют спеченные *NdFeB*. Примерно 60 % использующегося в промышленности магнитного материала *NdFeB* применяется в приводах компьютерных дисков.

Подверженность коррозии *NdFeB* вынуждает наносить на магниты покрытие. Окраска, покрытие эпоксидной смолой хороши в качестве защиты от окисления, но добавляют лишний слой между магнитом и другими частями изделия. Этот слой вызывает дополнительное магнитное сопротивление в цепи, подобно сопротивлению в электрической цепи. Покрытия никелем и цинком наиболее выгодны из-за возможности нанесения слоя очень малой толщины. Никель особенно эффективно защищает магнит от воздуха и влажности благодаря своей герметичности. Кроме того, это один из наиболее дешевых методов защиты от окисления. Как правило, толщина покрытия никелем не превышает 15-20 мкм.

В настоящее время магниты *NdFeB* доступны с присадками из различных материалов, такими как диспрозий, кобальт, ниобий, ванадий, галлий и т.д. Добавление данных химических элементов ведет к улучшению стабильности магнита с температурной и коррозионной точек зрения. Эти модифицированные магниты могут быть использованы до температур +220 °C. Для успешного использования при повышенных температурах дизайн магнитной цепи должен быть оптимизирован с точки зрения минимизации процессов размагничивания при высоких температурах.

При добавлении кобальта температура Кюри данных магнитов была несколько повышена, но типичной считается область 310-330 °С. Магниты из *NdFeB* в основном используются в промышленных моторах, датчиках и исполнительных механизмах. Военно-промышленный комплекс пока еще использует их в ограниченных размерах, однако, определённый прогресс в данной области налицо.

## **Магнитопласты — полимерные магниты**

Магнитопласты изготавливаются посредством смешения магнитного порошка и какой-либо связующей компоненты. В качестве связующего вещества могут применяться каучук, акрил, полиамид, термопластик, пластик, винил, эпоксидная смола, PPS и др.

Магнит изготавливается из смешанной массы следующими способами:

Каландрованием: прокаткой в сплошное полотно посредством прессования между двумя катками.

Выдавливанием: нагретая масса формируется путём выдавливания через отверстие определённого сечения.

Отливкой: нагретая масса впрыскивается в матрицу, где охлаждается до отверждения, затем матрицу открывают и извлекают отливку.

Прессованием под давлением: покрытый магнитный порошок помещается в полость матрицы и плотно сжимается под высоким давлением.

Магнитопласты обладают физическими свойствами, типичными для связующего материала. Каучуковый магнитопласт гибкий, не крошится и не ломается. Магнитопласты на основе эпоксидной смолы имеют хорошее сопротивление воздействию масел, бензинов и обычных растворителей. Основные органические связующие материалы имеют следующие характерные особенности:

Предел использования по температуре, соответствует температуре, при которой связующий материал теряет твердость (150-180 °С).

Негерметичность, из-за которой внутрь материала могут проникать вода и воздух, которые воздействуют на магнитные свойства материала.

Связующее вещество может набухать, впитывать влагу и как следствие, изменять свои размеры и терять прочность.

Правильный выбор связующего материала может минимизировать негативные эффекты.

Латунь, алюминий, сталь и даже высокотемпературные пластики могут быть использованы в процессе прессования данных магнитов, когда магнитные соединения формируются за счет перемешивания магнитного порошка и связующей компоненты.

Одновременная добавка в форму для литья двух компонент позволяет изготовить продукт, содержащий два различных материала. Это могут быть два магнитных материала или смесь магнитных материалов и пластика. Существует разновидность этого процесса, называемая многошаговым литьевым впрыском, когда разнородные материалы прессуются последовательно. Часто

с точки зрения магнитных свойств эта технология дает лучшие результаты, чем одновременное прессование.

Описанные процессы позволяют создавать как простые, так и очень сложные формы магнитов; с прямой, радиальной и многополюсной намагниченностью.

Рабочие температуры магнитопластов низки по сравнению с рабочими температурами спеченных магнитов. Использование разных магнитных порошков позволяет получить "гибридный" магнит, обладающий тем или иным набором свойств. Особенно полезны гибриды, представляющие собой смеси ферритового порошка с небольшим количеством редкоземельного порошка, обычно NdFeB. Разное процентное соотношение компонентов такого гибрида позволяет получить необходимые значения  $B_r$  и  $H_{c_j}$ .

Один из недостатков магнитопластов — верхний температурный предел использования, диктуемый температурным состоянием связующего материала. Эта величина обычно составляет от 80 °C до 220 °C. Полифенильный сульфид (*PPS*) обладает высокой температурой эксплуатации с минимальной абсорбирующей способностью и высоким сопротивлением вредному воздействию масел и других нефтепродуктов. В автомобильной промышленности уже начато изготовление магнитов с применением *PPS*. Хорошие результаты даёт также использование в качестве связующих компонент Нейлона 6 и 12.

Термоэластичные магнитопласты имеют верхний предел использования по температуре около 80 °C.

Максимальное энергетическое произведение у магнитопластов также ниже, чем у более плотных спеченных магнитных материалов. Типичные доли связующей компоненты в магнитопластах различного изготовления следующие:

Каландрование: 65 %

Выдавливание: 65-80 %

Отливка: 60-68 %

Прессование под давлением: 78-80 %

В целом весовая концентрация порошка колеблется от 60 % до 80 %. Причем при производстве магнитопластов и магнитоэластов используются порошки *NdFeB*, ферриты, Альнико и *SmCo*, а также их различные комбинации.

Одной из наиболее перспективных сфер применения магнитопластов является создание компактных и высокоэффективных электрических двигателей и приводов, а также различного рода датчиков. Возможность создания магнитов самой сложной формы и высокой намагниченности, а также хорошие механические свойства — основные конкурентные преимущества магнитопластов.

Так что же все-таки выбрать?

Основных критериев выбора два — стоимость и температурная стабильность.

Стоимость магнита почти всегда является основным критерием выбора. Цена является одной из основных величин, характеризующих магнит вместе с такой информацией, как тип материала, размер, форма, направление намагниченности и т.д.

В первую очередь необходимо рассматривать ферритовые магниты из-за их низкой стоимости.

В том случае, если особенно важна эффективность необходимо использовать редкоземельные магниты на основе *NdFeB*.

В том случае, если необходима высокая надежность и стабильность, необходимо применять магниты на основе SmCo или монокристаллические магниты на основе *NdFeB*.

Если магниты должны быть длинными (относительно их диаметра или ширины), необходимо выбирать Альнико. Короткие магниты делают из ферритов и семейства редкоземельных магнитных материалов.

Маленькие магниты сложной формы и намагниченности делают из магнитопластов.

## 6.2. Применение постоянных магнитов

Тема применения постоянных магнитов настолько обширна, что ее подробное освещение выходит за рамки данной статьи. Приведем лишь несколько примеров использования магнитных материалов в быту и промышленности:

- магнитные рекламные объявления и магнитная символика;
- телефонное оборудование, СВЧ-лампы и фильтры;
- автомобильные детали, такие как системы зажигания, датчики, стартеры, дверные замки, системы открывания/закрывания окон, система управления дворниками на ветровых стеклах и т.д.;
- периферийные устройства для компьютеров, а также офисное оборудование включая факсимильные аппараты, принтеры и копировальное оборудование;
- промышленные моторы, приводы для роботов и систем контроля полетов в авиации;
- акустические системы, часы, весы, микроволновые печи;
- маломощные моторы и приводы в аудио- и видеокамерах и магнитофонах;
- ускорители частиц высоких энергий и лазеры со свободными электронами, используемые в физических исследованиях и в промышленности;
- магнитные резонансные томографы для медицинских и промышленных целей (MRI — magnetic resonance imaging);
- вакуумные фильтры, стиральные машины и сушилки;
- магазинные принадлежности, такие как электрические ножницы/пилы, шлифовальные станки;

- детские игрушки.

На диаграмме 1 (рис.6.2.1) представлены доли в процентном выражении от общего мирового объема производства постоянных спеченных магнитов Nd-Fe-B, приходящиеся на различные сегменты рынка.



Рис.6.2.1. Диаграмма 1. Распределение производства спеченных магнитов Nd-Fe-B по сегментам рынка

Как видно из диаграммы, наиболее важным применением спеченных постоянных магнитов является их использование в электрических моторах постоянного тока. Обычно в этих устройствах применяются ферритовые постоянные магниты. Как известно, в моторах постоянного тока для изменения направления тока в обмотках ротора (движущаяся часть электродвигателя) используются щетки, т.е. оно производится механически. Постоянные магниты входят в состав статора (неподвижная часть) магнита, создающего постоянное магнитное поле. В 1989 г. были изобретены моторы с электрической системой переключения направления электрического тока. В этих системах постоянные магниты входят в состав ротора, электрические обмотки используются как статор и остаются неподвижными. Как правило, угловые координаты ротора определяются посредством измерения магнитного поля в непосредственной близости от ротора при помощи датчиков Холла, и в зависимости от координат производится переключение направления тока. Высокоэнергетичные спеченные магниты *Nd-Fe-B* в настоящее время рассматриваются как наиболее перспективные для использования в роторах таких электромоторов. Следует отметить, что важным является как большое значение намагниченности насыщения редкоземельных магнитов, обеспечивающее большой результирующий механический момент на валу электродвигателя, так и большое значение коэрцитивной силы, предотвращающее размагничивание ротора при его работе. Не менее важен и малый удельный вес спеченных магнитов *Nd-Fe-B* на единицу намагниченности, что при прочих равных условиях заметно уменьшает момент инерции ротора и повышает мощность мотора.

Моторы постоянного тока в основном используются в автомобилях, тем самым накладывая определенные и вполне понятные ограничения на стоимость входящих в их состав материалов. Как уже было сказано выше, до недавнего времени широко использовались ферритовые магнитные материалы из-за их дешевизны, однако сейчас наметилась тенденция к увеличению доли  $Nd-Fe-B$  магнитов в этом секторе производства.

В отличие от рассмотренных выше моторов постоянного тока, шаговый мотор при вращении проходит последовательно некоторое конечное количество положений. Обычный шаговый мотор имеет около 200 фиксированных положений на один оборот вокруг своей оси, что эквивалентно шагу по углу величиной  $1.8^\circ$ . Такие моторы применяются в периферийных устройствах для компьютеров, принтерах, плоттерах, жестких дисках, дисководов, видеокамерах, робототехнике и т.д. Очевидно, спеченные магниты  $Nd-Fe-B$  обладают наиболее подходящими характеристиками для изготовления на их основе роторов для шаговых моторов. Благодаря более высокому значению  $BH_{MAX}$  на 1 кг материала спеченных магнитов  $Nd-Fe-B$  по сравнению с ферритами и альнико, ротор из  $Nd-Fe-B$  будет обладать меньшей инерцией (и, очевидно, размером), что приведет к существенному улучшению технических показателей мотора без увеличения его стоимости. Кроме того, при использовании в качестве материала для ротора спеченных магнитов  $Nd-Fe-B$  возможно принципиальное упрощение конструкции мотора (и следовательно его стоимости) по следующим соображениям. В старых вариантах ротор шагового мотора имел вид длинного цилиндра, составленного из нескольких (около 5) толстых дисков с большим количеством параллельных оси цилиндра вырезов на его поверхности (рис. 6.2.2, а). Выступы на дисках соответствующим образом намагничивались. Количество выступов определяло количество фиксированных положений ротора мотора. Такая конструкция достаточно сложна в тех-

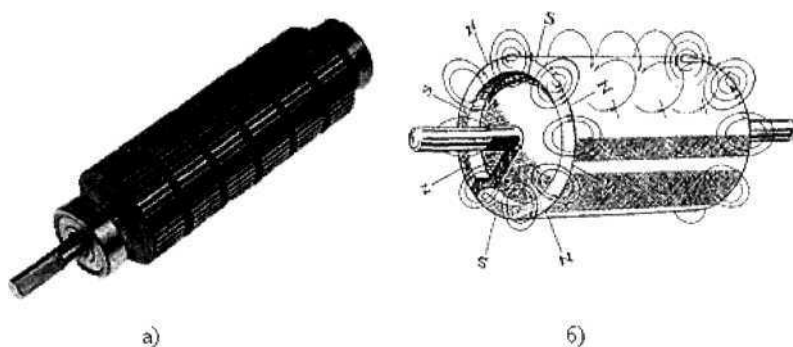


Рис. 6.2.2. Ротор шагового мотора в традиционной конструкции (а) и с использованием спеченных магнитов  $Nd-Fe-B$  (б)

ническом исполнении. Применение спеченных магнитов *Nd-Fe-B* позволило изготовить ротор в виде литого сплошного цилиндра без вырезов с последовательными областями намагниченности (рис.6.2.2, б). Очевидно, что новая конструкция значительно проще старой при одинаковых технических характеристиках, что и делает ее экономически более выгодной.

Одним из ведущих по объему рынком сбыта постоянных магнитов является рынок магнитных резонансных томографов для диагностических медицинских и промышленных целей. Для успешного функционирования томографа необходимо очень однородное по пространству и постоянное по времени магнитное поле в исследуемой области. Если требование однородности поля не будет выполняться (или будет выполняться с ненадлежащей точностью), то полученное изображение будет содержать трудноконтролируемые погрешности, связанные с распределением величины индукции магнитного поля в исследуемом объекте.

Поясним принцип действия резонансного томографа. При приложении магнитного поля магнитные моменты протонов водорода ориентируются по направлению поля. Если исследуемую область облучать переменным электромагнитным полем, то при совпадении частоты поля с собственной частотой магнитных частиц электромагнитное излучение будет поглощаться. При помощи специальных детекторов определяется распределение мощности поглощения по исследуемой области и исходя из этой информации вычисляется распределение концентрации протонов водорода. Протонов водорода много в мягких тканях и воде, но они отсутствуют в костной ткани. Таким образом, при помощи томографии возможна визуализация труднодоступных органов в теле человека. В первых магнитных томографах достичь требуемой однородности поля в области необходимого размера (а это значительные размеры, если исследуется тело человека) использовались сильные поля -- до 1.5 Т, для получения которых требовались сверхпроводящие магниты. Спеченные магниты семейства *Nd-Fe-B* идеально подходят как по своим физическим, механическим, так и экономическим параметрам для применения в магнитных резонансных томографах. В настоящее время использование постоянных магнитов *Nd-Fe-B* позволило создать томографы на постоянных магнитах с полем 3.0 Т. Это существенно расширяет сферу применения томографов, поскольку томографы на постоянных магнитах не требуют жидкого гелия в процессе эксплуатации.

Следующее важное применение постоянных магнитов -- в подвижных катушках (соленоидах), используемых в акустических динамиках, микрофонах а также при позиционировании компьютерных дисков и лентопротяжных устройств, зеркал в лазерных сканерах и т.д. Подвижные катушки успешно конкурируют с моторами постоянного тока и с шаговыми моторами в приложениях, связанных с точным позиционированием, т.к. у них нет "мертвого хода". Нет у них и проблем, связанных с неравномерным движением или потерей энергии при преобразовании кругового движения в поступательное. На рис. 3 а, б представлены два возможных способа конфигурации постоянно-



го магнита и катушки. В первом случае постоянный магнит имеет форму обычного диска, во втором постоянный магнит намагничен в радиальном направлении.

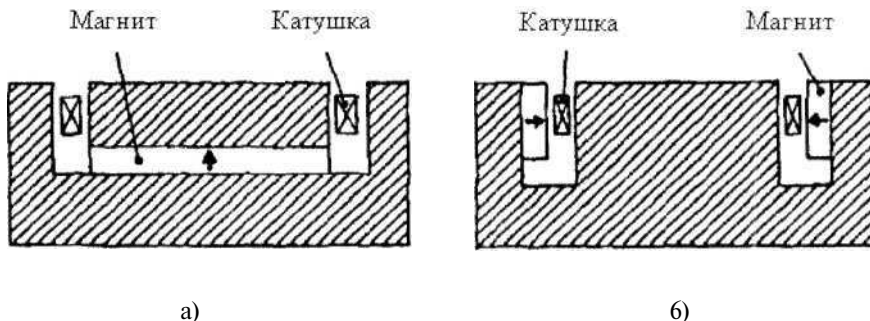


Рис. 6.2.3. Две возможных конфигурации катушки и магнита

Постоянный магнит крепко закреплен и неподвижен, а катушка движется линейно и поступательно в воздушном зазоре. В катушке нет железа и других магнитных материалов, а ее механическая прочность обеспечивается, как правило, пропиткой эпоксидными смолами — таким образом, исключаются потери на гистерезис и неточности в позиционировании катушки. Для уменьшения инертности, катушка должна иметь как можно меньшую массу, обеспечивая тем самым более высокое быстродействие прибора. Можно показать, что эффективность системы растет с увеличением плотности магнитного потока в воздушном зазоре. Поэтому в таких устройствах целесообразно применение высокоэнергетических постоянных магнитов.

В акустических катушках обычно применяются схемы, аналогичные представленной на рис. 6.2.3 (а), т.к. конструкцию с магнитом в виде диска с одноосной анизотропией легче собрать. Есть несколько причин, по которым наиболее удачным решением в таких устройствах будет использование постоянных спеченных магнитов  $Nd-Fe-B$ . Во-первых, спеченные магниты  $Nd-Fe-B$  обладают рекордным значением  $BH_{MAX}$  и следовательно создают в воздушном зазоре магнитный поток максимальной плотности. Во-вторых, спеченные магниты  $Nd-Fe-B$  характеризуются минимальными удельной массой и размером на единицу магнитной энергии, что позволяет изготавливать миниатюрные и легкие устройства. В-третьих, цена на этот материал относительно невелика и имеет тенденцию к дальнейшему снижению.

Значительную долю рынка сбыта магнитных материалов занимают производители магнитных сенсоров. Сенсоры используются для контроля параметров движения самых различных механизмов — от деталей самолета до промышленных моторов и автомобильных противоугонных систем. Типичная конструкция магнитного сенсора представляет собой жесткий диск с большим количеством выемок параллельно его оси на внешней поверхности цилиндра.

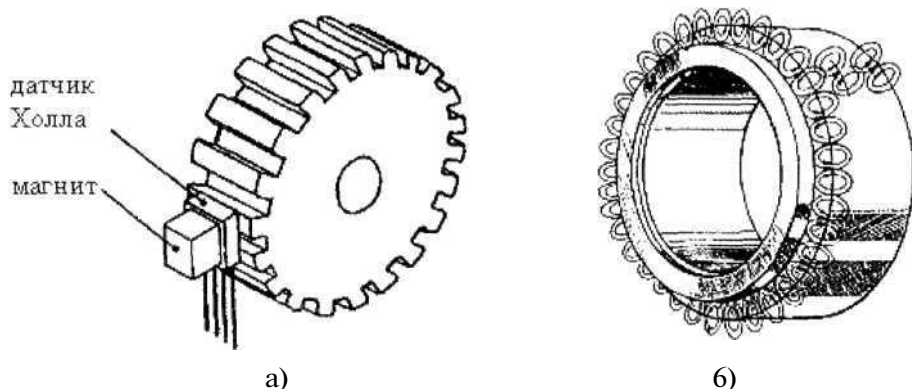


Рис. 6.2.4. Типичная (а) и оригинальная (б) конструкции магнитных сенсоров

Соответствующие выступы на цилиндре намагничены. Вблизи поверхности выступов расположен датчик магнитного поля Холла, который по изменению напряженности магнитного поля "чувствует" когда под ним выступ, а когда впадина, тем самым четко контролируя движение колеса сенсора. Чем больше вырезов (а значит и выступов) на поверхности цилиндра, тем большей чувствительностью обладает сенсор. Чувствительность также повышается при повышении плотности магнитного потока над выступами. Применение в качестве рабочего материала для цилиндра сенсора спеченных магнитов Nd-Fe-B значительно упрощает конструкцию сенсора (аналогично упрощению конструкции шагового мотора, см. выше по тексту) и повышает плотность магнитного потока вблизи поверхности цилиндра (рис 6.2.4 а, б). Это позволяет создавать более миниатюрные и дешевые устройства и, что крайне важно, обеспечить соответствующий зазор между датчиком и перемещающимися элементами конструкции.

## 6.3. Магнитные сепараторы

### Введение

Магнитные сепараторы — это многоцелевые системы, предназначенные для отделения магнитных примесей от немагнитных. Различают магнитные сепараторы, использующие в своей работе постоянные магниты и электромагниты. В данной публикации мы остановимся на освещении текущего положения дел и основных тенденций на рынке магнитных сепараторов, изготовленных на основе постоянных магнитов.

Спектр применения магнитных сепараторов на постоянных магнитах чрезвычайно широк — от фильтрования сыпучих порошков на производстве до очищения протеина и изоляции клеток в научных лабораториях. В частности, сепараторы используются в технологических процессах на

- горно-обогатительных предприятиях;
- предприятиях стекольной и керамической промышленности;
- сахарообработывающих заводах;
- предприятиях пищевой промышленности;
- химическом производстве;
- мусорообработывающих предприятиях и организациях по переработке

вторсырья и металлического лома

Широкое использование магнитного сепарирования в ряде секторов промышленности и сельского хозяйства стало возможным только после снижения цен на постоянные магниты неодим-железо-бор до 60-80 долларов за кг. Так, например, сепарация с использованием постоянных магнитов нашла свое применение даже в разведении племенного скота. Поскольку заметная часть случаев гибели племенных животных связана с попаданием в желудок инородных металлических тел (гвозди, шурупы и т.п.), то применение мощных постоянных магнитов, установленных в кормушках животных позволило существенно снизить количество случаев травматизма у животных.

Ниже перечислены наиболее распространенные материалы, очищаемые от магнитных примесей с использованием магнитных сепараторов:

- строительные и промышленные материалы (пески, глиноземы, керамические порошки);
- корм для животных (комбикорма, кормовые добавки, гранулы, сенаж, травяная мука);
- пищевые продукты (чай, мука, кофе, сахар);
- химические материалы (гранулированные ПВХ, полиэтилен, полипропилен и др.);
- промышленный, бытовой и строительный мусор (утилизация ж/б конструкций, б/у автопокрышек, автошин и т.д.);
- другие сыпучие материалы, в которых нежелательно присутствие магнитных примесей;

Магнитные сепараторы для сыпучих веществ (или т.н. линии магнитной задержки) обычно устанавливаются в трубопровод, по которому транспортируется сыпучий продукт. Сепараторы такого типа предназначены для удаления из сыпучих материалов случайно попавших железосодержащих примесей, при их небольших количествах. Очистка сыпучих материалов производится при их прохождении через систему магнитных труб различного диаметра, внутри которых расположены специальные магнитные системы, выполненные из спеченных постоянных магнитов неодим-железо-бор. Магнитные системы генерируют неоднородное магнитное поле, которое отделяет и удерживает магнитные примеси на поверхности магнитных труб. Магнитный сепаратор необходимо периодически очищать от накопленных магнитных примесей. Это может производиться вручную, полуавтоматически и автоматически в зависимости от типа сепаратора.

Магнитные сепараторы применяются при изготовлении стекла и керамики для очистки песка от железных частиц различного размера, которые придают нежелательные оттенки стеклу, снижают его прозрачность а также являются причиной появления "мушек" на керамической плитке. Применение сепараторов для обогащения шликера (фарфоровой суспензии) и глазури при производстве высококачественного фарфора позволяет исключать брак на изделиях, повысить их белизну, прочность и улучшить диэлектрические свойства. Следует отметить, что система сепараторов на постоянных спеченных магнитах NdFeB не размагничивается на протяжении всего срока службы, не требует затрат электроэнергии, полностью безопасна, удобна и проста в эксплуатации. Цена сепараторов на постоянных магнитах в значительной степени определяется стоимостью используемых магнитов неодим-железо-бор, а поскольку в подобных конструкциях как правило используются сравнительно крупные магниты простой формы, то и себестоимость подобных устройств получается сравнительно невысокой.

На Западе большие сепарационные системы на постоянных магнитах широко применяются в мусороперерабатывающих производствах для выделения из камней, резины, целлюлозы и т.д. железных и других магнитных материалов. В России этот вид переработки только начинает развиваться, хотя есть примеры российских заводов, занимающихся утилизацией старых автомашин, на которых успешно действуют линии по переработке бывших в употреблении автопокрышек и извлечению металлического корда. По технологии, разработанной компанией Almas Ltd., изношенные шины подаются в машину для удаления бортовых колец, после чего шины поступают в шинорез и далее в роторную дробилку. Затем смесь поступает в магнитный сепаратор. После охлаждения и измельчения резиновая крошка вновь проходит очистку в магнитном сепараторе. Выход металла составляет порядка 25% от общего выхода материала. В итоге для получения 1 тонны резиновой крошки расходуется в среднем 1.54 тонны шин.

Ниже обсуждаются основные типы, используемых в настоящее время сепараторов на постоянных магнитах.

### **6.3.1. Барабанные сепараторы**

Как правило, магнитные барабанные сепараторы исполняются в виде шкивов и располагаются в конце или по ходу конвейера. Они используются для очистки транспортируемого материала от магнитных примесей в целях улучшения качества очищаемого материала и предотвращения поломок дорогостоящего обрабатывающего оборудования. На рис.6.3.1 показаны небольшие магнитные барабанные сепараторы двух типов. Здесь в качестве материала для стационарной системы постоянных магнитов используются спеченные магниты *NdFeB*.

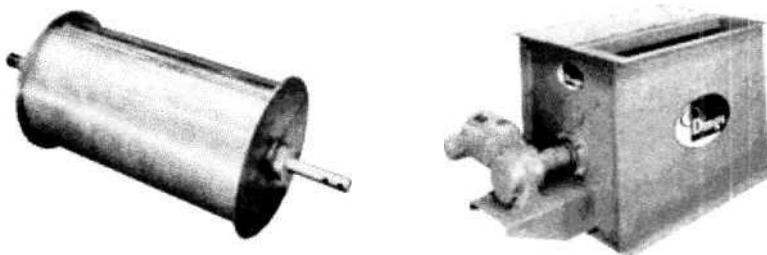


Рис. 6.3.1. Малогабаритные барабанные сепараторы  
(Dings Co., Magnetic Group)

Сухие крупногабаритные сепараторы (рис.6.3.2) используются в горнорудной промышленности для выделения магнетита и других магнитных частиц из руды. Эти сепараторы можно разделить на две категории:

- сепараторы с низкой напряженностью для повышения качества сильно магнитных руд;
- сепараторы с высокой напряженностью для обогащения слабо магнитных руд и удаления парамагнитных загрязнений из промышленных минералов

Барабанные сепараторы с низкой напряженностью используются в основном для повышения качества магнетитовых железных руд при влажном или сухом производственном процессе. В качестве источника магнитного поля в них задействованы постоянные магниты из феррита бария, генерирующие в зоне сепарации магнитное поле не более 0,2 Т.

Областью практического применения сепараторов с высокой напряженностью является переработка тонкодисперсных слабомагнитных железных руд, ильменитовых руд и береговых песков а также удаление железных загрязнений из тонкодисперсных промышленных минералов и для осветления каолина. Они обеспечивают высокую производительность при напряженности поля в зоне сепарации не менее 1-1,5 Т. До недавнего времени источником магнитного поля в таких сепараторах служили электромагниты, потреблявшие значительное количество электроэнергии. В то же время указанная выше напряженность поля вполне может быть достигнута при использовании высокоэнергетичных магнитов  $NdFeB$ . В связи с чем в последние годы появились разработки, где в качестве источника магнитного поля для сепараторов с высокой напряженностью применяются особым образом сконфигурированные постоянные магниты  $NdFeB$ .

Крупногабаритные магнитные барабанные сепараторы состоят из вращающегося барабана, переносящего руду и системы постоянных магнитов, используемых в качестве источников постоянного магнитного поля. Попадая в зону действия магнитного поля, магнитные частицы "прилипают" к поверхности барабана и отрываются уже в зоне отсутствия магнитного поля. Диапазон

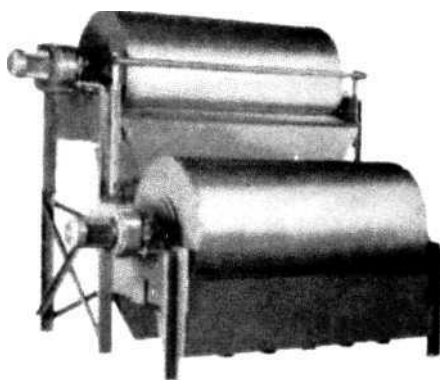


Рис. 6.3.2. Сухие промышленные сепараторы для обогащения в тяжелой среде (одиночная конфигурация) (Dings Co., Magnetic Group)

магнитных полей в непосредственной близости от защитного покрытия — от 500 до 1000 Гаусс.

Разделение магнитных и немагнитных материалов в барабанных сепараторах происходит при их движении по рабочей поверхности барабана, т.н. обечайке. Обечайка изготавливается из немагнитной нержавеющей стали (иногда с применением покрытия из стеклоткани или керамического покрытия для дополнительной механической защиты), вращающейся вокруг неподвижной системы постоянных магнитов. Магнитная система расположена внутри барабана и занимает до половины его окружности в сечении. Магнитные частицы притягиваются к поверхности барабана и удерживаются магнитными силами. "Прилипнув" к вращающейся поверхности барабана, магнитная примесь выносятся из области сильного магнитного поля неподвижной системы постоянных магнитов и собирается в мусоросборник, тем самым осуществляя разгрузку барабана. Полезный немагнитный продукт (это может быть зерно, мука, песок, руда и т.д.) не испытывает действия магнитной силы притяжения и практически сразу сходит с барабана по баллистической траектории под действием центробежной силы, силы тяжести и силы трения. Сепараторы такого типа выполняются в одиночной и двойной конфигурациях. В двойной конфигурации используются два барабана, вращающихся в противоположных направлениях вокруг вертикальной оси вращения.

Рассмотрим основные конфигурации магнитных барабанных сепараторов на примере "кормовых" сепараторов, которые используют для очистки корма животных от посторонних металлических предметов (рис. 6.3.3). Как видно из рисунка, для эффективной работы сепаратора как правило достаточно чтобы магнитная система заполняла лишь некоторый его сектор.

Барабанные магнитные сепараторы отличаются друг от друга конфигурацией магнитного поля в рабочей области (рис. 6.3.4 а, б). При использовании высокоэнергетичных спеченных магнитов  $NdFeB$  благодаря высокому значе-



Рис. 6.3.3. Различные типы конфигурации барабанного магнитного сепаратора (Dings Co., Magnetic Group)

нию напряженности магнитного поля у поверхности барабана конфигурация, изображенная на рис. 6.3.4, б, позволяет существенно уменьшить массу используемого магнитного материала без ущерба для основных технических характеристик устройства. В последнее время разрабатываются барабаны магнитных сепараторов с неоднородным распределением магнитного поля (рис. 6.3.4, в, г, д). При проектировании распределения магнитного поля, важно не только обеспечить максимальные показатели для напряженности магнитного поля в рабочей области сепарации, но также предусмотреть преобладание

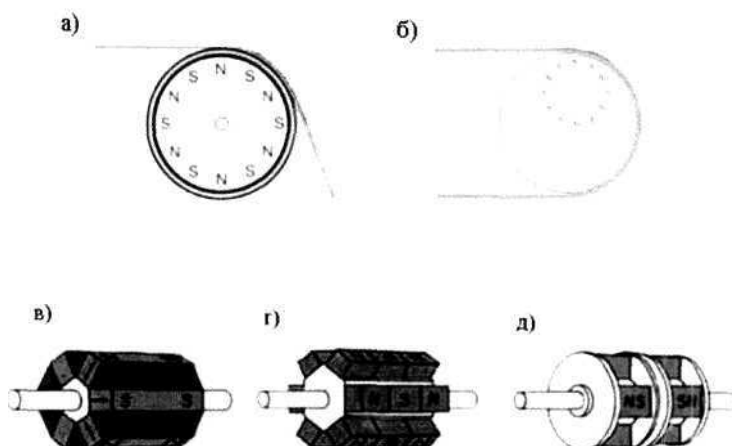


Рис. 6.3.4. Различные распределения магнитного поля в рабочей области барабана из-за различия в расположении постоянных магнитов внутри барабана. (Dings Co., Magnetic Group)

нормальной составляющей поля к поверхности барабана по отношению к тангенциальной. В противном случае тангенциально действующие магнитные силы нарушат плавное движение магнитных частиц под действием силы трения о поверхность барабана.

### 6.3.2. Плоские магнитные сепараторы

Плоские магнитные сепараторы применяются для очистки сыпучих материалов при их транспортировке по конвейеру. Они изготавливаются на основе постоянных магнитных материалов (альнико, ферриты, керамические магниты, а в последнее время — спеченные постоянные магниты неодим-железо-бор). Схематичное устройство плоских магнитных сепараторов представлено на рис. 6.3.5.

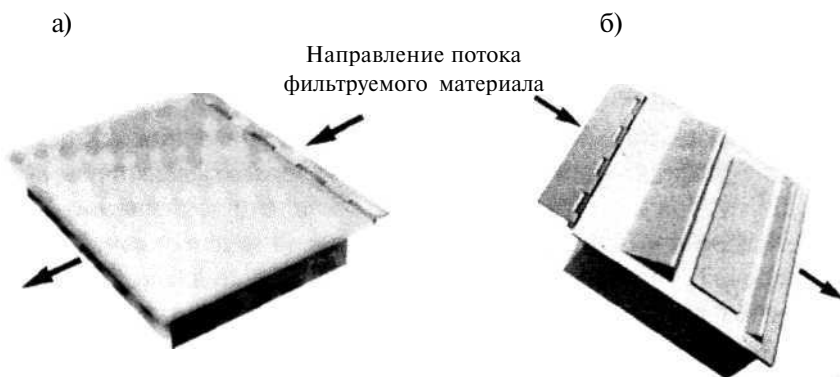


Рис 6.3.5. Два решения для плоских магнитных сепараторов: а) сепаратор помещается над потоком очищаемого материала и б) материал движется непосредственно по сепаратору (Dura Magnetics, Inc)

Использование плоских магнитных сепараторов оправдывает себя даже в тех случаях, когда технологический процесс требует, чтобы транспортировка сыпучего материала осуществлялась по вертикальной или близкой к вертикальной направляющей. Применение хитрой конструкции как на рис. 6 позволяет уменьшить скорость потока материала и фильтровать его в несколько стадий. По мере фильтрации магнитные сепараторы загрязняются магнитным/металлическим ломом и для их очистки применяется следующая процедура: прекращается подача очищаемого материала, со стенок конвейера убираются сепараторы, вследствие чего магнитный/металлический лом просыпается по конвейеру и подлежит дальнейшей утилизации.



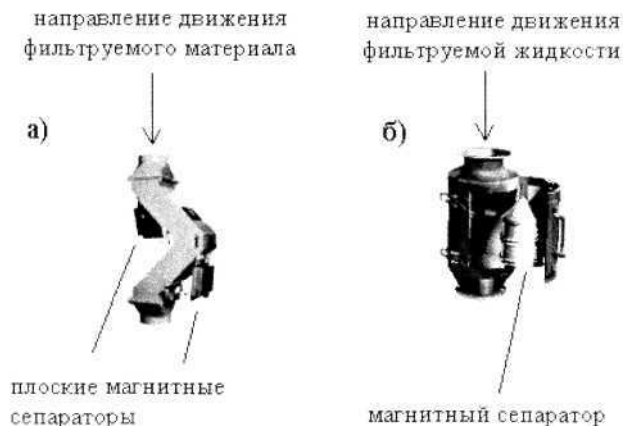


Рис. 6.3.6. Очистка сухого сыпучего (а) и жидкого (б) материалов при вертикальной транспортировке (Eriez Manufacturing Co.; Approtec, Inc.)

### 6.3.3. Магнитные сепараторы из системы выдвижных решеток

Магнитные выдвижные решетки удаляют инородный металл из порошков или легкосыпучих материалов: сахара, специй, зерна, других пищевых продуктов, различных пластиков, химикатов и т.д. Они легко устанавливаются в систему прямоугольных или круглых труб для эффективного удаления ферромагнитной примеси из легкосыпучих материалов.

Магнитные решетки изготавливаются из мягкой стали и представляют собой металлическую прямоугольную рамку со вставленными магнитными стержнями. Раньше постоянные магниты изготавливались на основе альнико, ферритов или керамики, однако в последнее время все чаще используются спеченные магниты  $NdFeB$ . На рис.6.3.7 представлена примерная схема устройства решетчатого сепаратора.



Рис. 6.3.7. Схема магнитной сепарационной решетки

Конструкция из нескольких последовательно расположенных магнитных решеток образует магнитный сепаратор. Чаще всего встречаются четырехрешеточные варианты для выделения мелких частиц железа и в двухрешеточные для выделения крупных частиц. Деление частиц на мелкие и крупные достаточно условно, выбор же конкретного сепаратора осуществляется в соответствии с требованиями заказчика. Магнитные сепараторы из решеток очищаются от "магнитного мусора" только вручную, для чего в устройстве сепаратора предусмотрены специальные дверцы для доступа к магнитам и их последующей очистки. На рис.6.3.8 приведен простейший четырехрешеточный сепаратор.

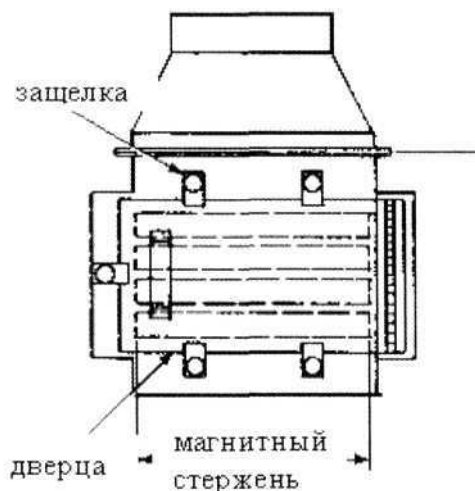


Рис. 6.3.8. Четырехрешеточный магнитный сепаратор

### 6.3.4. Основные разновидности комплексных магнитных сепарационных систем

#### Лабораторные магнитные сепараторы низкой мощности

Сепараторы этого типа представляют собой небольшие легкие в управлении приборы, предназначенные для удаления ферромагнитных частиц в научно-исследовательских и контрольных лабораториях. Материал, подлежащий разделению, засыпается сверху в воронку из нержавеющей стали, под которой находится постоянный магнит, вращающийся в том же направлении, что и подаваемый материал. Магнитные частицы "прилипают" к поверхности защитной оболочки сепаратора и двигаются по дуге под действием магнитного поля вращающихся магнитов. Регулируемый разделитель отделяет магнитные

частицы от немагнитных. Размеры частиц могут варьироваться от 6 мм до 0.074 мм. Средняя производительность таких аппаратов составляет от 100 до 250 кг/час. Типичный пример сепаратора низкой мощности приведен на рис. 6.3.9.



Рис. 6.3.9. Магнитный сепаратор низкой мощности  
(Outokumpu Technology Inc.)

### **Лабораторные магнитные сепараторы высокой мощности**

Приборы такого типа представляют собой лабораторные магнитные сепараторы с высокой потребляемой мощностью, предназначенные для разделения т.н. слабо- или умеренно парамагнитных частиц (в отличие от лабораторных сепараторов низкой мощности, которые "отлавливают" ферромагнитные частицы). Устройства являются настольными и удобны для проведения различных исследований над минералами. Такие сепараторы выделяют частицы размером от 1 мм до 0.074 мм. Их производительность достигает 100 кг/час для материалов с плотностью  $1600 \text{ кг/м}^3$ . В этих сепараторах слабомагнитные частицы попадают в локальные области сильного магнитного поля и отделяются от немагнитных под действием силы тяжести и сильного градиента магнитного поля. Вращающийся магнитный ролик используется для перемещения магнитных частиц в активной зоне и сообщает различное центробежное ускорение магнитным и немагнитным частицам. Эта технология эффективна для выделения частиц слабомагнитного материала из немагнитного порошка. Высокомощные сепараторы обрабатывают материалы с различной температурой - от  $0^\circ\text{C}$  до  $15^\circ\text{C}$ . Типичный пример сепаратора высокой мощности приведен на рис. 6.3.10.

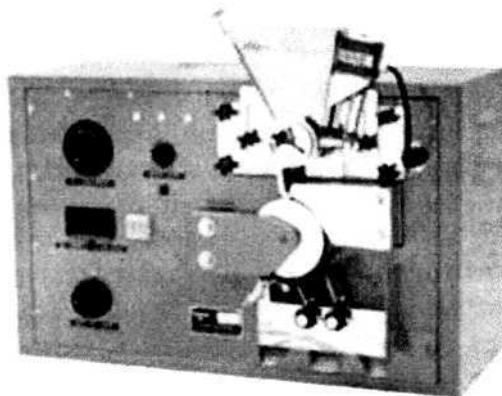


Рис. 6.3.10. Магнитный сепаратор высокой мощности (Outokumpu Technology Inc)

### **Магнито-силовой барабанный сепаратор на постоянных магнитах**

Данный прибор представляет собой полупромышленный высокоэффективный магнитный сепаратор, предназначенный для разделения частиц, имеющих различные величины магнитной восприимчивости (рис. 6.3.11). Этот сепаратор в некотором смысле объединяет в себе два предыдущих типа описанных сепараторов — высокомощного и низкомощного. Барабанный сепаратор является чрезвычайно чувствительным к слабым изменениям величины магнитной восприимчивости и позволяет производить более тщательную сепарацию. Кроме того, барабанные сепараторы оказываются особенно полезными

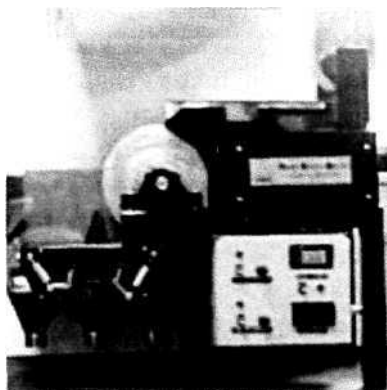


Рис. 6.3.11. Магнито-силовой барабанный сепаратор на постоянных магнитах (Outokumpu Technology Inc.)

при выделении слабопарамагнитных примесей. Использование спеченных магнитов *NdFeB* при изготовлении барабанов обеспечило большую величину магнитного поля на поверхности ролика, чем в других устройствах подобного типа. В данном сепараторе размеры частиц могут варьироваться от 0.074 мм до 12.5 мм. Эффективность подобных сепараторов достигает 1088 кг/час при объемной плотности материала 1600 кг/м<sup>3</sup>.

### **Магнитный сепаратор металлов с использованием трехкатушечной системы**

Сепараторы этого типа предназначены для выделения как немагнитных, так и магнитных металлов из обогащенной руды (рис. 6.3.12). Прибор оборудован системой из трех катушек, которая оказывается значительно более чувствительной, чем использовавшаяся несколько лет назад и являвшаяся стандартом однокатушечная система. Устройство состоит из двух снимающих катушек и одной центральной передающей катушки. Все катушки намотаны в одном направлении. При работе центральная катушка генерирует высоко-частотный электромагнитный сигнал, переменное электрическое поле достигает две получающие катушки. Система находится в равновесии до тех пор, пока обе получающие катушки поглощают одинаковую мощность.

Как только металлический наполнитель проходит через электрическое поле сенсора, катушки раскомпенсируются. Расбалансировка сразу же обрабатывается микропроцессором в дополнительном устройстве, по результатам обработки включается система удаления металлических частиц.

Наименьшее время сепарации (около 0.25 с) достигается только при обеспечении достаточно малого размера отделяемых частиц. Удаление магнитных

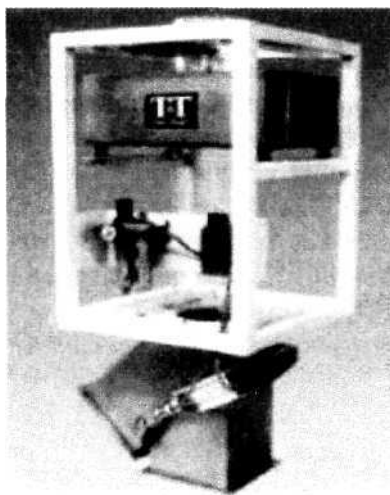


Рис. 6.3.12. Магнитный сепаратор металлов с трехкатушечной системой детектирования (T&T Technology)

крупинок производится при помощи постоянного магнита на основе неодим железо бор.

## Литература:

1. Magnetic percolation phenomenon in high-field high-gradient separators Vincent-Viry, O.; Mailfert, A.; Gillet, G.; Diot, F. *Magnetics*, IEEE Transactions on , Volume: 36 Issue: 6 , Nov 2000 Page(s): 3947 -3952
2. Magnetic separation of kaolin clay using an advanced 9 T separator Iannicelli, J.; Pechin, J. *Applied Superconductivity*, IEEE Transactions on , Volume: 10 Issue: 1, March 2000 Page(s): 917 -922
3. Novel magnetic separators Leupold, H.A.; Tilak, A.S. *Magnetics Conference*, 1999. Digest of INTERMAG 99. 1999 IEEE International, 1999 Page(s): ES06 -ES06
4. A high gradient magnetic separator fabricated using Bi-2223/Ag HTS tapes Jin, J.X.; Dou, S.X.; Liu, H.K.; Neale, R.; Attwood, N.; Grigg, G.; Reading, T.; Beales, T. *Applied Superconductivity*, IEEE Transactions on , Volume: 9 Issue: 2 Part: 1 , June 1999 Page(s): 394 -397
5. Superconducting open-gradient magnetic separator utilizing the braking effect of an axial component of magnetic force Pitel, J.; Chovanec, F. *Applied Superconductivity*, IEEE Transactions on , Volume: 9 Issue: 2 Part: 1, June 1999 Page(s): 382 -385
6. HTS high gradient magnetic separation system Daugherty, M.A.; Coulter, J.Y.; Hults, W.L.; Daney, D.E.; Hill, D.D.; McMurry, D.E.; Martinez, M.C.; Phillips, L.G.; Willis, J.O.; Boenig, H.J.; Prenger, F.C.; Rodenbush, A.J.; Young, S. *Applied Superconductivity*, IEEE Transactions on , Volume: 7 Issue: 2 Part: 1, June 1997 Page(s): 650 -653
7. A microfabricated planar magnetic particle separator with optically inspectable flow channel Wenjin Zhang; Ahn, C.H. *Engineering in Medicine and Biology Society*, 1996. Bridging Disciplines for Biomedicine., 18th Annual International Conference of the IEEE , Volume: 1 , 1997 Page(s): 252 -253 vol.1
8. G. Gillet and F. Diot, "Evolution technologique dans le domaine du tri magnetique," *Mines Carrieres-Les Techniques*, vol. I, pp. 4-14, June 1996.
9. G. Gillet and V. Bureau, "Separation Magnetique: Applications," *Mines Carrieres*, vol. 74, pp. 95-111, Oct. 1992.
10. M. Takayasu, R. Gerber, and F. J. Friedlaender, "Magnetic separation of submicron particles," *IEEE Trans. Magn.*, vol. MAG-19, pp. 2112-2117, Sept. 1983.
11. E.C. Hise, *IEEE Trans. Magn.*, vol. Mag -18, p.847, 1982.
12. J.X.Jin *et al*, *Superconducting Sci Tech*, v.11, pp. 1071-1074, 1998.
13. www.ndfeb.ru

### 6.3.5. Магнитные сепараторы научно-производственной фирмы "ЭРГА"

#### Фирма "ЭРГА"

Фирма "ЭРГА" создана в 1991 году на базе НИИ материалов электронной техники ведущими специалистами в области разработки и производства редкоземельных магнитов и магнитных систем оборонной промышленности.

Основные направления деятельности фирмы в настоящее время:

- промышленное производство высокоэнергетических спеченных магнитов и многополюсных магнитных систем на основе редкоземельных сплавов *Nd-Fe-B* и *SmCo*;
- разработка и производство магнитов на полимерной основе (магнитопластов) любых геометрических конфигураций с широким диапазоном свойств на основе феррита стронция и *NdFeB*;
- разработка и производство магнитных сепараторов для различных областей промышленности, по требованию заказчика;
- проектирование и производство магнитных систем (для широкого применения в различных отраслях).

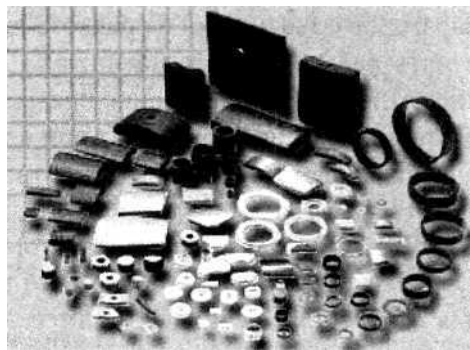
Кроме того, специалистами фирмы разработаны и выпускаются несколько типов медицинских изделий.

ООО "ЭРГА" обладает площадями и производственным оборудованием, позволяющем выпускать спеченные магниты различных типоразмеров в объеме до 20 тонн в год и магнитопласты в объеме не менее 10 тонн в год.

Магниты производства фирмы "ЭРГА" находят применение в следующих областях:

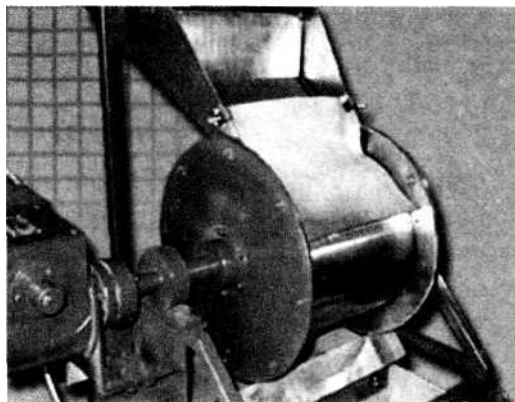
- оборонная промышленность;
- автомобильная промышленность (электронные датчики, электродвигатели, генераторы, стартеры и др. изделия);
- мототехника;
- аудиотехника;
- медицинская техника (магнитные медицинские устройства);
- спец. техника (тралы, подъемные системы).

Разработанные специалистами предприятия технологии позволяют выпускать спеченные магниты *Nd-Fe-B* и *SmCo* с максимально возможными магнитными свойствами, повышенной температурной стабильностью и коррозионной стойкостью. Сравнительно новым (с 1997 года) для предприятия является производство магнитопластов,



но и здесь достигнуты результаты, не уступающие лучшим мировым образцам.

В области разработки и производства редкоземельных магнитов и магнитопластов на их основе фирма "ЭРГА" занимает одну из ведущих позиций в России. "ЭРГА" располагает экспериментальной и производственной базами, достаточными для решения научно-производственных задач высокой степени сложности.



В настоящее время "ЭРГА" производит на заказ магнитные сепараторы для пищевой, строительной, химической и перерабатывающей промышленности.

Сепараторы уникальной конструкции выполнены на основе высокоэнергетических магнитов *Nd-Fe-B*. Магнитные сепараторы фирмы "ЭРГА" служат для очистки сыпучих материалов (мука, чай, различные гранулы, тальк, шихта и т.п.), а также жидкостей (растворы, суспензии, глазурь и т.п.) от ферромагнитных примесей (металлическая пыль, опилки, гвозди и т.д.).

Разрабатывается и внедряется в производство "цветной" сепаратор, который служит для сепарации черного и цветного металла одновременно.

Обладая качеством и свойствами аналогичными с зарубежными образцами наши изделия значительно дешевле.

Магнитные системы, разработанные ведущими специалистами "ЭРГА", находят широкое применение в гражданской и оборонной промышленности:

- грузоподъемные устройства на основе постоянных магнитов (до 2 тонн);
- магнитные "пластыри" для ликвидации течи ГСМ и других продуктов (нефтепроводы, газопроводы и т.п.);
- магнитные тралы для сбора ферромагнитных материалов на большой площади.

Научно-производственная фирма "ЭРГА" предлагает широкий выбор сепараторов с магнитами из редкоземельных металлов, магнитная сила которых в пять раз превышает магнитную силу обычных керамических магнитных систем, а так же существенно превосходит по эффективности электромагниты. Такие магниты используются при очистке материалов от очень мелких металлических частиц либо там, где требуется максимально возможная степень защиты.

Что такое магнитные сепараторы?

Магнитные сепараторы — это многоцелевые системы, предназначенные для отделения магнитных примесей от немагнитных. Различают магнитные сепараторы, использующие в своей работе постоянные магниты и электромаг-



ниты. Наша фирма специализируется на изготовлении сепараторов на основе постоянных магнитов.

Для чего это нужно?

Магнитные сепараторы задерживают ферромагнитные и немагнитные ("цветной сепаратор") тела и частицы, которые недоброкачественно влияют на Вашу продукцию.

В чем преимущества нашего предложения?

**Экономичность:** не требуют привлечения дополнительной энергии, работают за счет постоянного магнитного поля.

**Качество Вашей продукции:** гарантия получения чистого продукта, без металлических тел и частиц.

**Прибыль:** резко снижается выход брака.

**Высокие технологии:** благодаря магнитной системе *Nd-Fe-B*, наши сепараторы полностью заменяют собой устаревающие ферритовые и электромагнитные системы.

**Защита:** исключаются поломки оборудования от попадания металлических тел.

**Удобство:** не требуют корректировки технологического процесса. Автоматическая система очистки.

Где применяют?

Спектр применения магнитных сепараторов на постоянных магнитах чрезвычайно широк — от фильтрования горячего шоколада на кондитерских фабриках, до обогащения слабомагнитных руд на горно-обогатительных комбинатах. В частности, сепараторы используются в следующих технологических процессах:

- на горно-обогатительных предприятиях;
- предприятиях стекольной и керамической промышленности;
- сахарообработывающих заводах;
- предприятиях пищевой промышленности;
- химическом производстве;
- производстве пластмассовых изделий;
- мусорообработывающих предприятиях и организациях по переработке вторсырья и металлического лома.

Что сепарируют?

Ниже перечислены наиболее распространенные материалы, очищаемые от магнитных примесей с использованием магнитных сепараторов:

- строительные и промышленные материалы (пески, глиноземы, керамические порошки);
- корм для животных (комбикорма, кормовые добавки, гранулы, сенаж, травяная мука);
- пищевые продукты (чай, мука, кофе, сахар);
- химические материалы (гранулированные ПВХ, полиэтилен, полипропилен и др.);

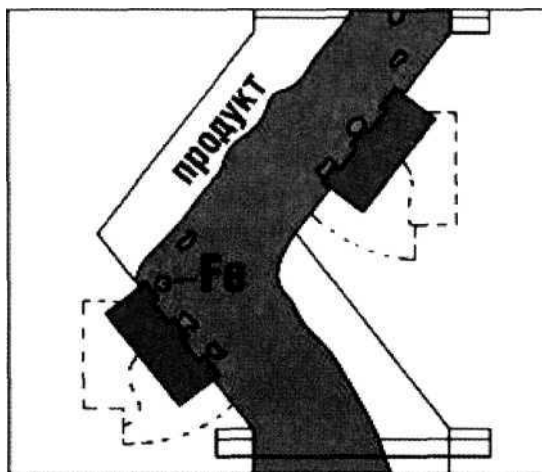
- промышленный, бытовой и строительный мусор (утилизация ж/б конструкций, б/у автопокрышек, автошин и т.д.);
- другие сыпучие материалы, в которых нежелательно присутствие магнитных примесей.

Как выбрать подходящий сепаратор?

Фирма ЭРГА выпускает магнитные сепараторы различной конфигурации, для работы в различных условиях, спроектированные соответствующим образом. Так же сепараторы существенно различаются по назначению и возможностям их применения.

### Сепаратор магнитный — серия ПСМ

В настоящее время научно-производственной компанией "ЭРГА" разработаны и успешно внедрены в производство пластинчатые магниты сепарации для применения в различных условиях.



Назначение

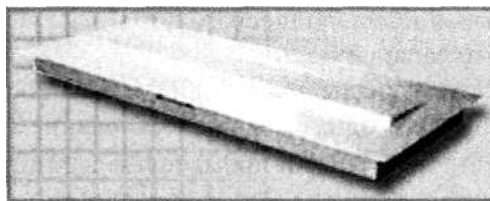
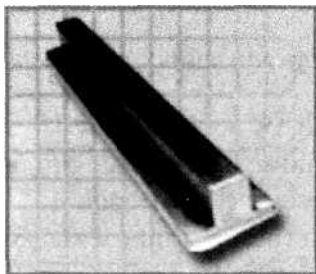


Рис.6.3.14. Схема 1. Принцип работы

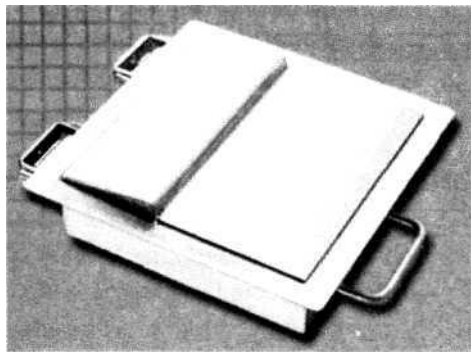


Рис. 6.3.15.

Пластинчатый сепаратор (ПСМ) улавливает случайные ферромагнитные частицы, попадающие в продукт, проходящем по пневмотранспорту.

### УСТАНОВКА

Пластинчатые магниты устанавливаются в наклонных желобах и трубопроводах.

### ПРИНЦИП РАБОТЫ

ПСМ имеет направленное магнитное поле, перекрывающее проходное сечение пневмотранспорта, по которому движется продукт. Это позволяет задерживать случайно попадающие ферромагнитные тела и частицы. Все пластинчатые магнитные сепараторы содержат магниты из сплава на основе *Nd-Fe-B* и могут быть изготовлены в соответствии со стандартами, существующими в пищевой промышленности. Пластинчатые магниты не требуют постоянного ухода, выпускаются разных типоразмеров, мощности и конфигурации в зависимости от конкретных условий работы.

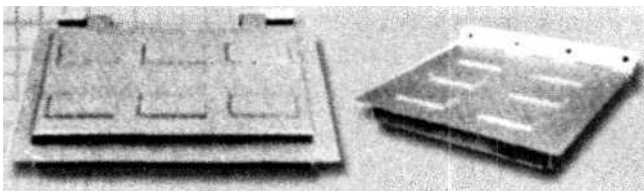


Рис. 6.3.16.

## Магнитная система

### "Ломаное колено"

Используется там, где существует опасность застревания улавливаемого металла над слоем движущего материала или если требуется несколько этапов сепарации.

### ТЕХНИЧЕСКИЕ ДАННЫЕ ПЛАСТИНЧАТЫХ МАГНИТОВ:

- Максимальная индукция на поверхности магнитных блоков при  $t=20(^{\circ}\text{C})$  до 500 (мТл);
- Максимальная рабочая температура не более 100 ( $^{\circ}\text{C}$ );
- Материал магнитной системы *Nd-Fe-B*,  $(BH)_{\text{max}}$  270 кДж/м<sup>3</sup>;

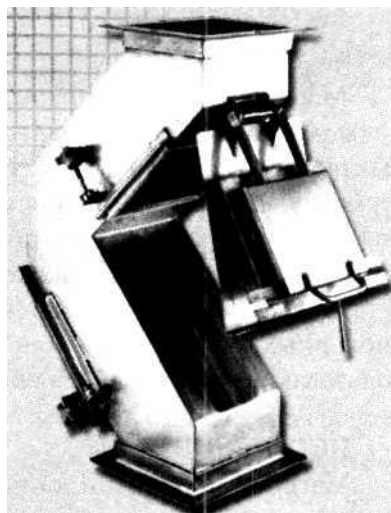
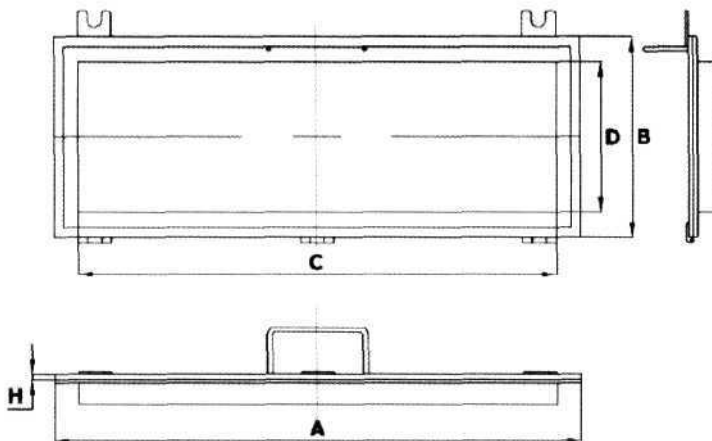


Рис. 6.3.17.



Габаритные размеры А,В,С,Д,Н - под технологическую линию заказчика

- Очистка магнитного сепаратора — ручная;
- Масса задерживаемых металлических частиц от 0,001 до 1 кг;
- Габаритные размеры — по требованию заказчика.

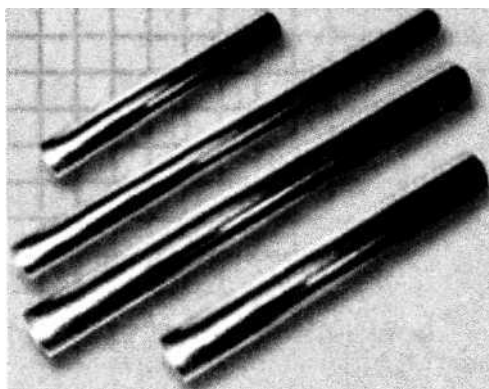
Направление, площадь и сила магнитного поля зависят от компоновки системы магнитами и формируются в зависимости от требований заказчика.

## Магнитные стержни

Магнитные стержни МСС (на постоянных магнитах)

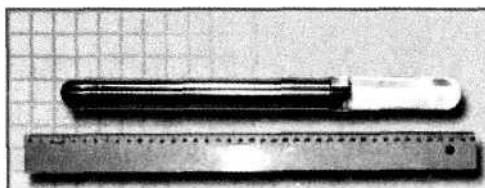
### НАЗНАЧЕНИЕ

Магнитные стержни предназначены для извлечения ферромагнитных примесей из твердых сыпучих материалов, и жидкостей. Используются там, где существует потребность эффективной очистки материала, но отсутствует возможность установки стационарных сепараторов, или их использование не находит обоснования.

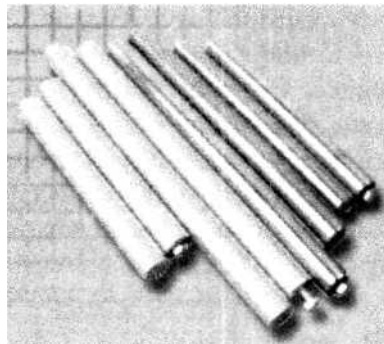


### ИСПОЛЬЗОВАНИЕ

Магнитные стержни на постоянных магнитах устанавливаются в любом месте твердого или жидкого потока материала. Простая конструкция позволяет устанавливать магнитные стержни практически в любых



средах (в том числе агрессивных). Данные изделия имеют высокий коэффициент сопротивления коррозии и длительный срок службы, при их правильном использовании.

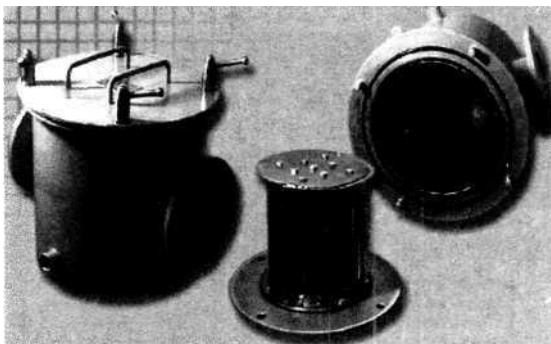


### ТЕХНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

- Предлагаемые диаметры: 20 мм, 25 мм.
- Предлагаемая длина: от 100 мм.
- Магнитная индукция на поверхности: от 400 до 800 мТл.
- Рабочая температура: от -50 до 100 °С
- Магнитные стержни выполняются из нержавеющей стали 12Х18Н10Т, и комплектуются высокоэнергетичными магнитами на основе *Nd-Fe-B*.

### Сепаратор магнитный — серия СМТП

В настоящее время научно-производственной компанией "ЭРГА" разработаны и успешно внедрены в магнитные сепараторы серии СМК для сепарации различных жидкостей транспортируемых в трубопроводах.



### НАЗНАЧЕНИЕ

Используются для эффективного улавливания случайных металлических частиц в сухих сыпучих, гранулированных материалах, транспортируемых в пневмотранспорте.

### УСТАНОВКА

СМК монтируется в линию пневмотранспорта, где продукт движется самотеком или под невысоким давлением.

### ПРИНЦИП РАБОТЫ

Основным элементом конструкции сепаратора является магнитная решетка, выполненная в виде трубок из нержавеющей стали с уникальной магнитной системой внутри. Использование двухслойной решетки позволяет полностью перекрыть все сечение сепаратора, что практически исключает прохождение металлических включений через сепаратор. Для сохранения неизменным проходного сечения сепаратора корпус последнего имеет увеличенный периметр. Основным достоинством данной конструкции является применение магнит-

ных стержней консольной конструкции, что в значительной степени упрощает процесс очистки. Магнитная система установлена на съемном фланце и имеет резиновое уплотнение. Количество рядов магнитных стержней от 2-х до 4-х. Возможно изготовление сепараторов с конструкцией "Стержень в стержне".

#### ТЕХНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ:

- Напряженность магнитного поля на поверхности стержней составляет от 400 до 950 мТл;
- Материал магнитной системы  $Nd-Fe-B$ ,  $(BH)_{max}$  290 кДж/м<sup>3</sup>;
- Очистка магнитного сепаратора — ручная;
- Рабочая температура: от -50 до 130 (°C);
- Производительность до 100 т/час;
- Габаритные размеры — по требованию заказчика.

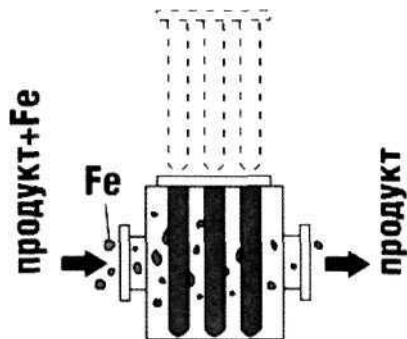
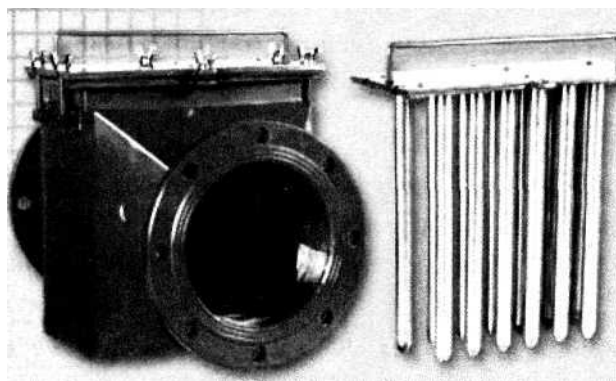
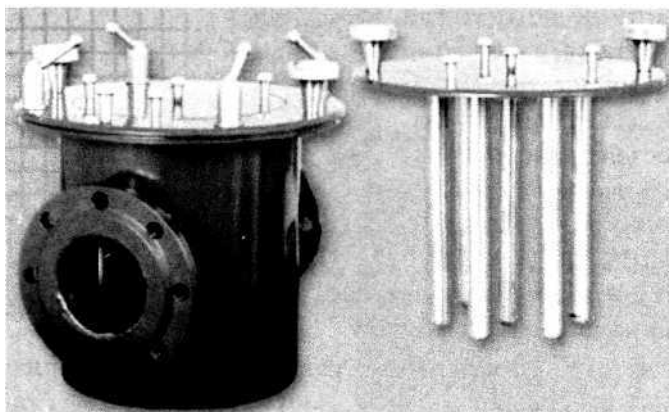
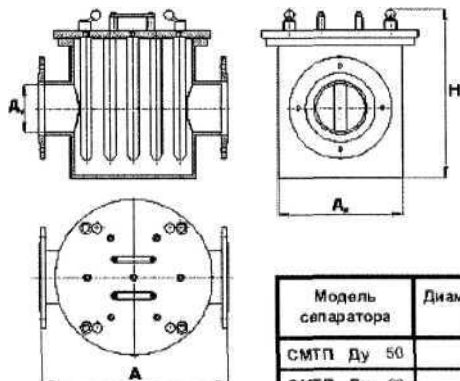


Схема 1. Принцип работы СМТП



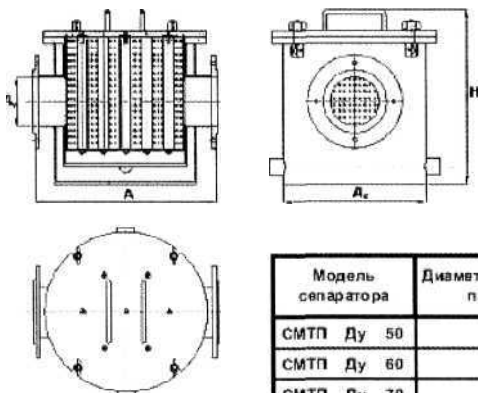
## СМТП1



| Модель сепаратора | Диаметр выходного патрубка | Габаритные размеры |     |     | Количество стержней |
|-------------------|----------------------------|--------------------|-----|-----|---------------------|
|                   |                            | А                  | Н   | Дк  |                     |
| СМТП Ду 50        | 50                         | 250                | 150 | 150 | 5                   |
| СМТП Ду 60        | 60                         | 275                | 180 | 175 | 5                   |
| СМТП Ду 70        | 70                         | 300                | 210 | 200 | 5                   |
| СМТП Ду 80        | 80                         | 325                | 240 | 225 | 7                   |
| СМТП Ду 90        | 90                         | 350                | 270 | 250 | 7                   |
| СМТП Ду 105       | 105                        | 370                | 300 | 270 | 9                   |

## СМТП2

с водяной системой подогрева  
и нержавеющей сеткой



| Модель сепаратора | Диаметр выходного патрубка | Габаритные размеры |     |     | Количество стержней |
|-------------------|----------------------------|--------------------|-----|-----|---------------------|
|                   |                            | А                  | Н   | Дк  |                     |
| СМТП Ду 50        | 50                         | 250                | 175 | 190 | 5                   |
| СМТП Ду 60        | 60                         | 275                | 205 | 215 | 5                   |
| СМТП Ду 70        | 70                         | 300                | 235 | 240 | 5                   |
| СМТП Ду 80        | 80                         | 325                | 265 | 265 | 7                   |
| СМТП Ду 90        | 90                         | 350                | 295 | 290 | 7                   |
| СМТП Ду 105       | 105                        | 370                | 325 | 310 | 9                   |

## Сепаратор магнитный — серия СМ/СМК

В настоящее время научно-производственной компанией "ЭРГА" разработаны и успешно внедрены в производство магнитные сепараторы для пневмотранспорта серий СМ и СМК

Сепараторы серий СМ и СМК различаются по возможностям сепарации фракций различных размеров.

## Сепараторы типа СМ

### НАЗНАЧЕНИЕ

Используются для эффективного улавливания случайных ферромагнитных частиц в сухих сыпучих, гранулированных материалах, транспортируемых в пневмотранспорте.

Установка СМ монтируется в линию пневмотранспорта, где продукт движется самотеком или под невысоким давлением с загруженностью линии не более 50%.

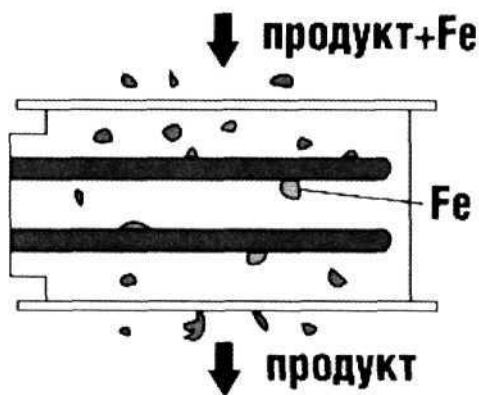
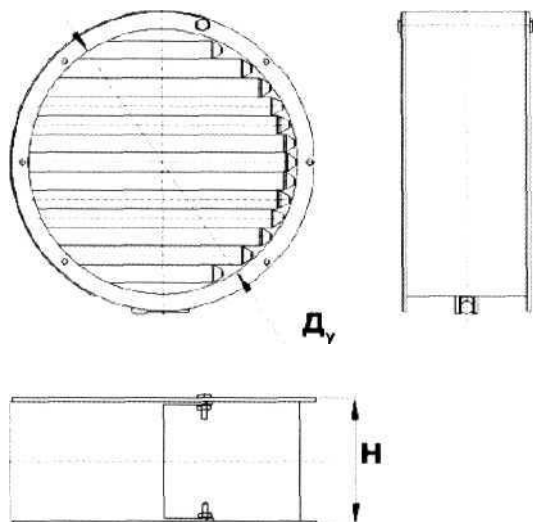


Схема 1. Принцип работы СМ



| Диаметр внутреннего сечения Ду | Высота H | Количество магнитных стержней |
|--------------------------------|----------|-------------------------------|
| 200                            | 170      | 7                             |
| 250                            | 170      | 9                             |
| 300                            | 170      | 11                            |
| 325                            | 200      | 13                            |
| 350                            | 220      | 15                            |



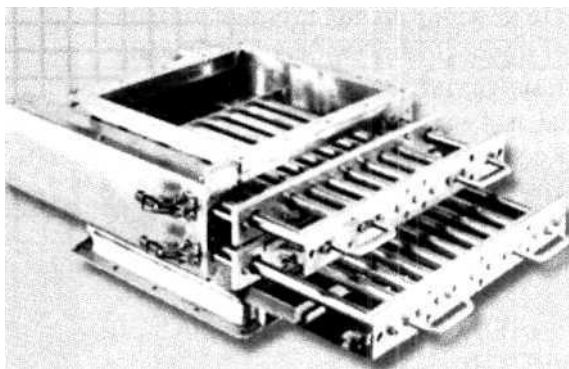
## ПРИНЦИП РАБОТЫ

Основным элементом конструкции сепаратора является магнитная решетка, выполненная в виде трубок из нержавеющей стали с уникальной магнитной системой внутри. Использование двухслойной решетки позволяет полностью перекрыть все сечение сепаратора, что практически исключает прохождение ферромагнитных частиц через сепаратор. Магнитная система установлена на консольном фланце и имеет резиновое уплотнение.

## ТЕХНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ:

- Напряженность магнитного поля на поверхности стержней составляет от 400 до 650 мТл;
- Диаметр магнитных стержней — 25 мм;
- Материал магнитной системы  $Nd-Fe-B$ ,  $(BH)_{max}$  290 кДж/м<sup>3</sup> ;
- Очистка магнитного сепаратора — ручная;
- Рабочая температура: от -50 до 130 (°C);
- Производительность до 5 т/час;
- Габаритные размеры - - по требованию заказчика.

Технические параметры могут изменяться по требованию заказчика.



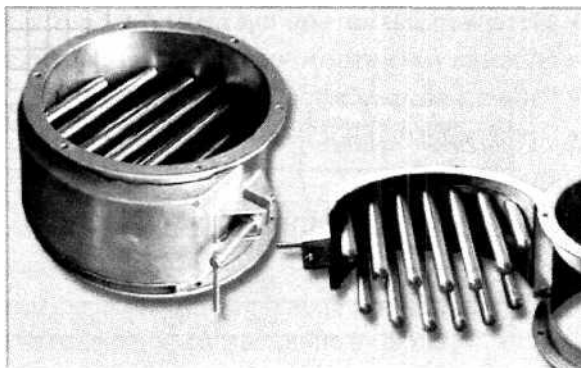
## Сепараторы типа СМК

### НАЗНАЧЕНИЕ

Используются для эффективного улавливания случайных металлических частиц в сухих сыпучих, гранулированных материалах, транспортируемых в пневмотранспорте.

### УСТАНОВКА

СМК монтируется в линию пневмотранспорта, где продукт движется самотеком или под невысоким давлением.



## ПРИНЦИП РАБОТЫ

Основным элементом конструкции сепаратора является

магнитная решетка, выполненная в виде трубок из нержавеющей стали с уникальной магнитной системой внутри. Использование двухслойной решетки позволяет полностью перекрыть все сечение сепаратора, что практически исключает прохождение металлических включений через сепаратор. Для сохранения неизменным проходного сечения сепаратора корпус последнего имеет увеличенный периметр. Основным достоинством данной конструкции является применение магнитных стержней консольной конструкции, что в значительной степени упрощает процесс очистки. Магнитная система установлена на съемном фланце и имеет резиновое уплотнение. Количество рядов магнитных стержней от 2-х до 4-х. Возможно изготовление сепараторов с конструкцией "Стержень в стержне".

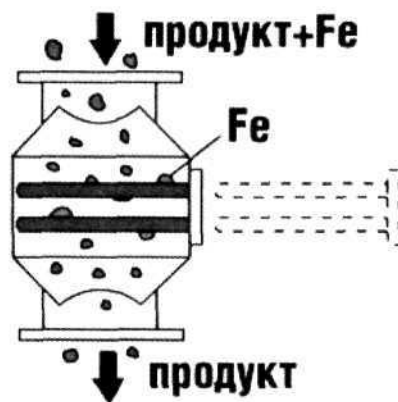
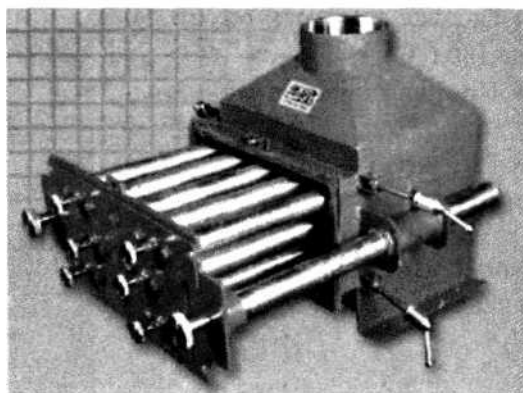


Схема 2. Принцип работы СМВК



#### ТЕХНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

- Напряженность магнитного поля на поверхности стержней составляет от 400 до 950 мТл;
- Материал магнитной системы  $Nd-Fe-B$ ,  $(BH)_{max}$  290 кДж/м<sup>3</sup> ;
- Очистка магнитного сепаратора — ручная;
- Рабочая температура: от -50 до 130 ( °С);
- Производительность до 100 т/час;

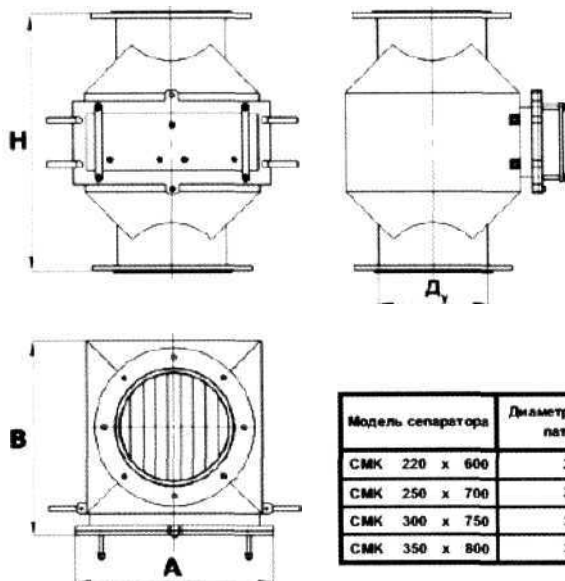
#### Сепаратор магнитный — серия СМР

В настоящее время научно-производственной компанией "ЭРГА" разработаны и успешно внедрены в производство магнитные решетки сепарации для мобильного применения в различных условиях.

#### НАЗНАЧЕНИЕ

Магнитные решетки предназначены для извлечения ферромагнитных примесей из сыпучих материалов и жидкостей.

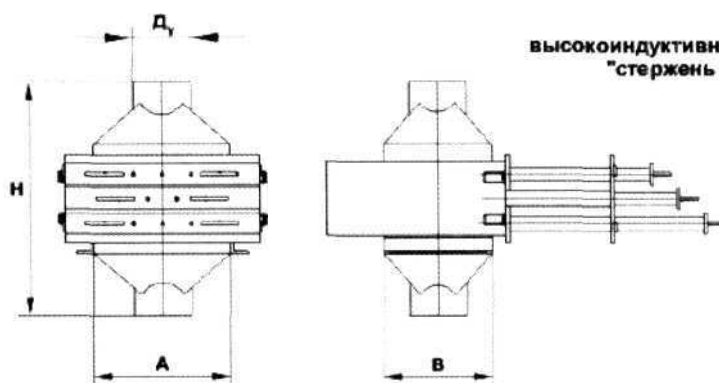
## СМК1



| Модель сепаратора | Диаметр входного патрубка | Габаритные размеры |     |     | Количество стержней |
|-------------------|---------------------------|--------------------|-----|-----|---------------------|
|                   |                           | А                  | В   | Н   |                     |
| СМК 220 х 600     | 220                       | 390                | 350 | 600 | 13                  |
| СМК 250 х 700     | 250                       | 420                | 380 | 700 | 13                  |
| СМК 300 х 750     | 300                       | 500                | 450 | 750 | 15                  |
| СМК 350 х 800     | 350                       | 550                | 500 | 800 | 17                  |

## СМК2

высокоиндуктивная система  
"стержень в стержне"



| Модель сепаратора | Диаметр входного патрубка | Габаритные размеры |     |     | Количество магнитных стержней (d 35 мм) |
|-------------------|---------------------------|--------------------|-----|-----|-----------------------------------------|
|                   |                           | А                  | В   | Н   |                                         |
| СМК 220 х 600     | 220                       | 400                | 300 | 600 | 14                                      |
| СМК 250 х 650     | 250                       | 430                | 300 | 650 | 14                                      |
| СМК 300 х 700     | 300                       | 480                | 350 | 700 | 17                                      |
| СМК 350 х 750     | 350                       | 550                | 400 | 750 | 20                                      |
| СМК 400 х 800     | 400                       | 600                | 450 | 800 | 23                                      |

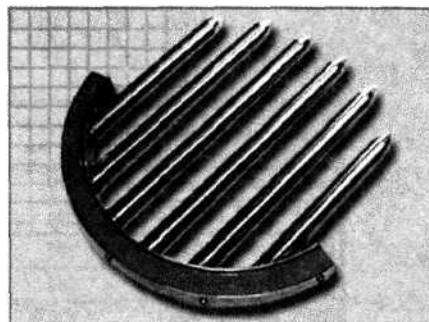
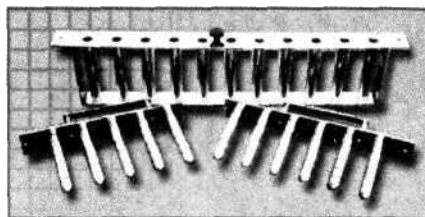
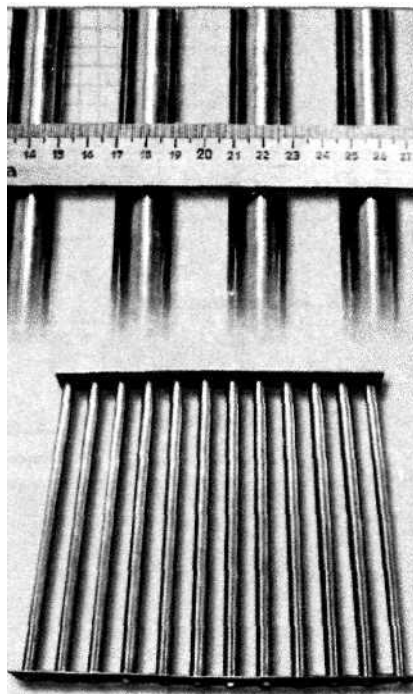
## УСТАНОВКА И ПРИНЦИП РАБОТЫ

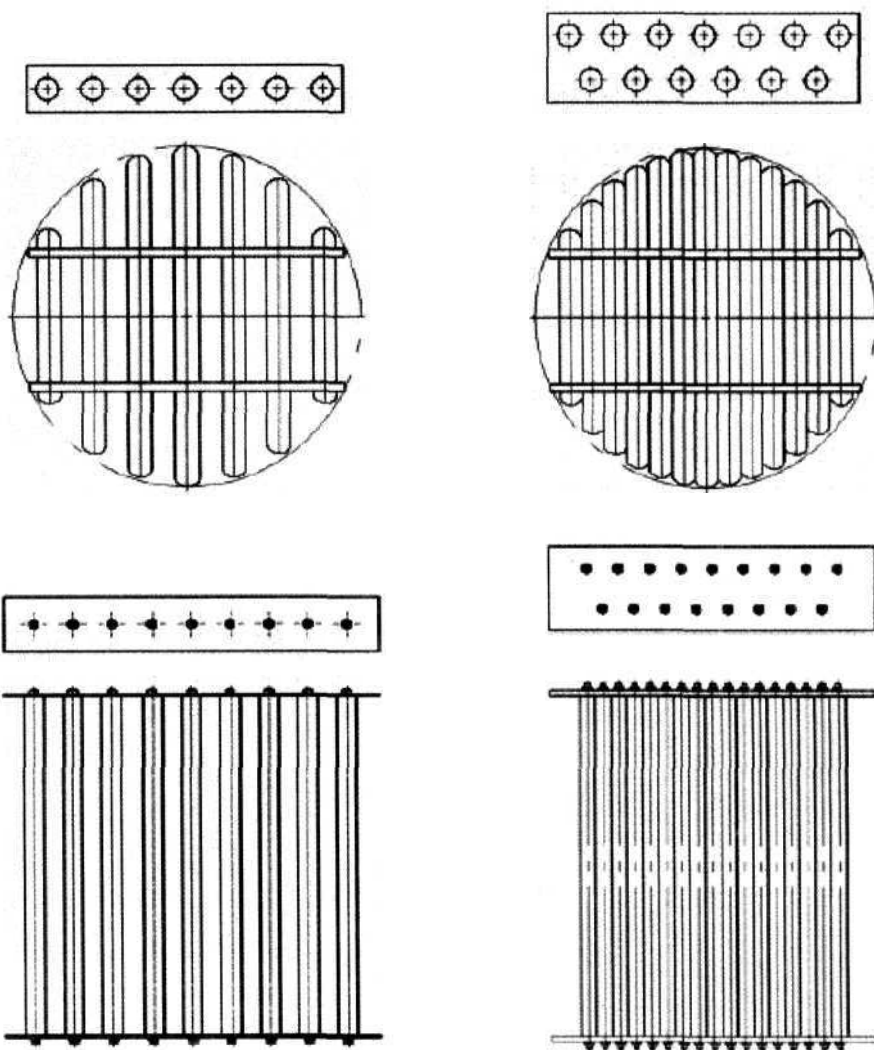
Магнитные решетки на постоянных магнитах могут быть выполнены в виде различных геометрических форм (круг, квадрат, пирамида (многослойная система) и т.п.), что позволяет их устанавливать практически в любом месте твердого или жидкого потока материала (бункер, желоб, квадратный/круглый пневмотранспорт и т.п.). Использование 2-слойной системы позволяет полностью перекрыть все проходное сечение решетки, что практически исключает прохождение металлических частиц через решетку. Ферромагнитные тела и частицы оседают на магнитных стержнях, а очищенный продукт продолжает движение по технологической цепочке.

## ТЕХНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

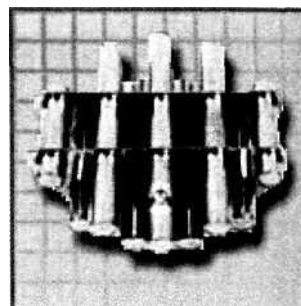
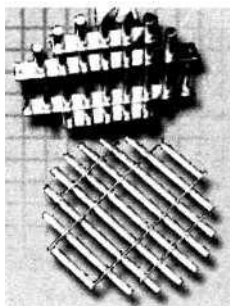
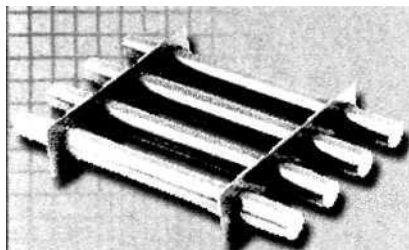
- Предлагаемые диаметры стержней решетки: 20, 25, 30, 40 мм;
- Напряженность магнитного поля на поверхности решетки составляет от 400 до 950 мТл;
- Материал магнитной системы  $Nd-Fe-B$ ,  $(BH)_{max}$  290 кДж/м<sup>3</sup>;
- Очистка магнитного сепаратора — ручная;
- Рабочая температура: от -50 до 130 (°C);
- Производительность до 50 т/час;
- Габаритные размеры - - по требованию заказчика.

Магнитные решетки, выполняются из нержавеющей стали 12Х18Н10Т, и комплектуются высокоэнергетичными магнитами на основе  $Nd-Fe-B$ .





| Диаметр магнитного<br>стержня | Магнитная<br>индукция, мТл |
|-------------------------------|----------------------------|
| 20                            | 300 - 450                  |
| 25                            | 400 - 600                  |
| 30                            | 500 - 700                  |
| 35                            | 500 - 850                  |
| 40                            | 550 - 950                  |



## Сепаратор магнитный — серия СМВТ

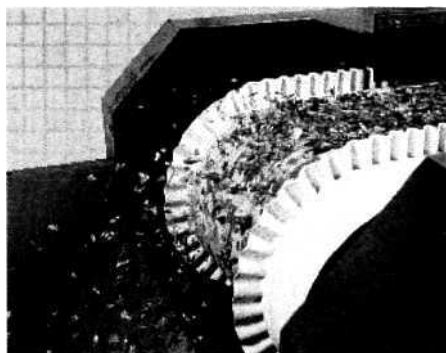
В настоящее время научно-производственной компанией "ЭРГА" разрабатывается и подготавливается к производству магнитный сепаратор вихревого тока серии СМВТ для сепарации "цветных" металлов.

### НАЗНАЧЕНИЕ

Сепаратор магнитный СМВТ предназначен для отделения цветных металлов от черных металлов и от неметаллов.

### УСТАНОВКА

Сепараторы вихревого тока обычно применяют в тех местах, где присутствует возможность установки нового оборудования в существующую технологическую линию с небольшими конструктивными доработками.



### ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ

Сепаратор цветных металлов представляет собой горизонтально расположенный ленточный транспортер, который состоит из натяжного барабана и магнитного приводного ротора. Приводной барабан и магнитный ротор имеют автономные регулируемые приводы вращения. Принцип действия сепаратора заключается в наведении электродвижущей силы (ЭДС) в токопроводящих материалах вращающимся магнитным полем. Это взаимодействие создает, в зависимости от веса цветных металлов, различные траектории

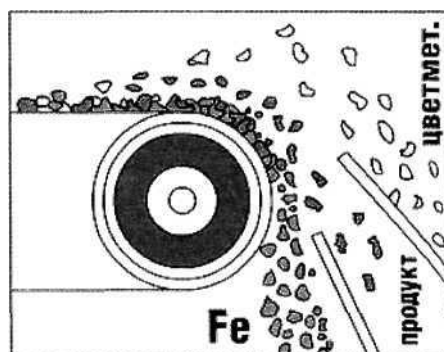
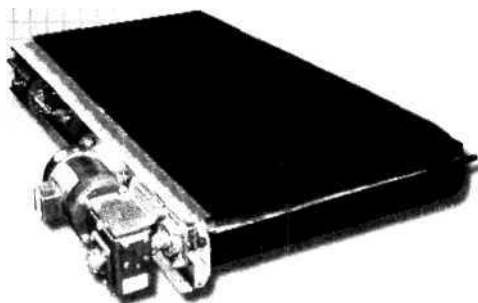


Схема 1. Принцип работы СМВТ

падения материалов. Используя разницу траектории движения металлов и инертной массы осуществляется их сепарация.



#### ТЕХНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

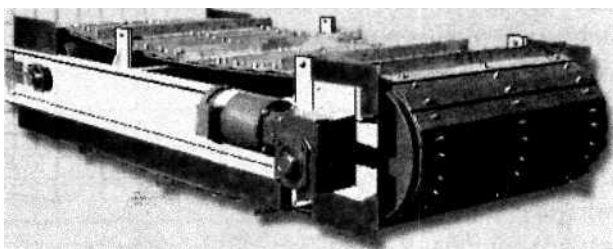
- Максимальная индукция на поверхности внешнего барабана при  $t=20$  ( $^{\circ}\text{C}$ ) до 400 (мТл);
- Максимальная рабочая температура до 130 ( $^{\circ}\text{C}$ );
- Материал магнитной системы  $\text{Nd-Fe-B}$ ,  $(\text{BH})_{\text{max}}$  290 кДж/м<sup>3</sup> ;
- Производительность от 1 до 20 т/час;
- Масса отделяемых тел цветных металлов — от 0,01 до 3 кг.

### Сепаратор магнитный — серия СМПА/СМПР

В настоящее время научно-производственной компанией "ЭРГА" разработаны и успешно внедрены в производство магнитные сепараторы серии СМПА/СМПР для улавливания металлических частиц из гранулированного материала, транспортирующегося по конвейеру, виброжелобу.

#### НАЗНАЧЕНИЕ

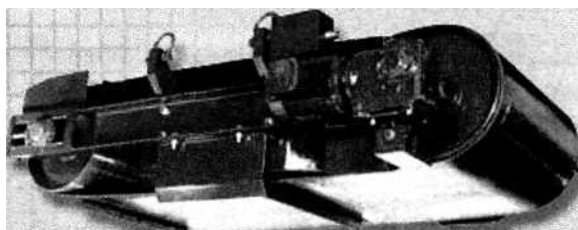
Сепаратор магнитный СМПА/СМПР предназначен для высококачественного удаления ферромагнитных металлических частиц из гранулированных сыпучих, материалов, транспортируемых по конвейеру и виброжелобу. Обычно применяют там, где отсутствует возможность установки сепараторов барабанного типа или не требуется удаление мелких ферромагнитных частиц.



#### УСТАНОВКА ОБЩАЯ

Подвесные сепараторы обычно располагаются над конвейером на высоте 100-250 мм над сепарируемым продуктом.

Магнитные сепараторы СМПА/ СМПР специально спроектированы для работы в сложных условиях и выполняются из материалов с высокой устойчивостью к



коррозии. Подобные сепараторы могут использоваться для сепарирования крупных ферромагнитных тел.

## КЛАССИФИКАЦИЯ И РАЗЛИЧИЯ

1. Подвесные системы магнитной сепарации различаются по способу очистки от ферромагнитных частиц на: системы автоматической очистки СМП-А (рис. 2) и системы ручной очистки СМП-Р (рис. 3).

2. Так же возможны различные варианты установки для сепараторов типа СМП-А (Схемы 1, 2).

Принцип работы СМП-Р и СМП-А:

В основу работы сепаратора положен принцип извлечения магнитных примесей из гранулированных сыпучих материалов с помощью магнитного поля, создаваемого постоянными магнитами на основе  $Nd-Fe-B$ . Во время движения по конвейеру материал попадает в зону действия магнитного поля, начинается его сепарация. Под действием мощного магнитного поля ферромагнитные частицы притягиваются к поверхности сепаратора (к ленте транспортера) и удерживаются на нем до момента его автоматической очистки. Очищенный материал продолжает движение по конвейеру.

## УСТРОЙСТВО

### 1. СМП-Р

Основу сепаратора составляет магнитная система, на основе  $Nd-Fe-B$ , и очистной лоток закрывающий магнитную систему. Крепежные элементы выполняются в соответствии с требованиями заказчика

### 2. СМП-А

Подвесной сепаратор с автоматической очисткой СМП-А представляет собой горизонтально расположенный ленточный транспортер, который состоит из приводного-натяжного барабана и

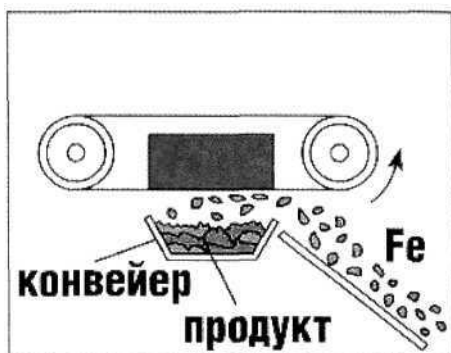
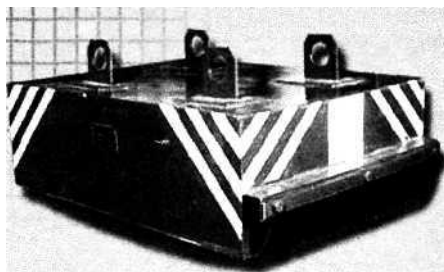


Схема 1. Способ установки № 1

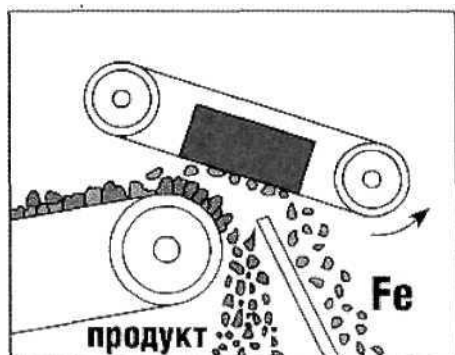
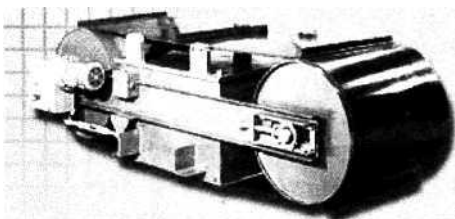
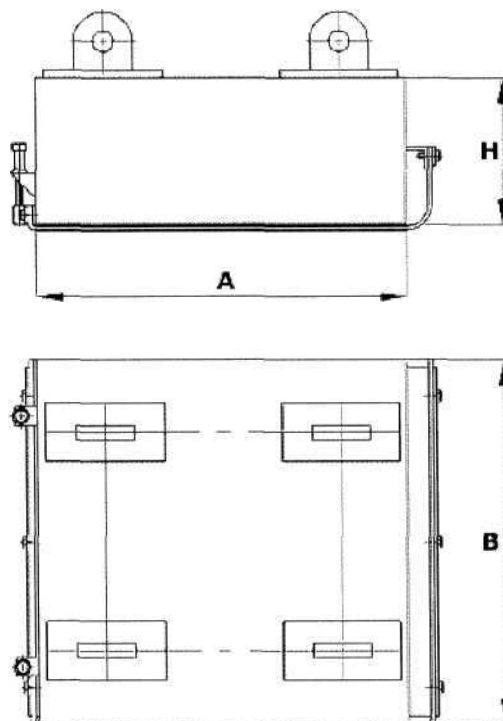


Схема 2. Способ установки № 2

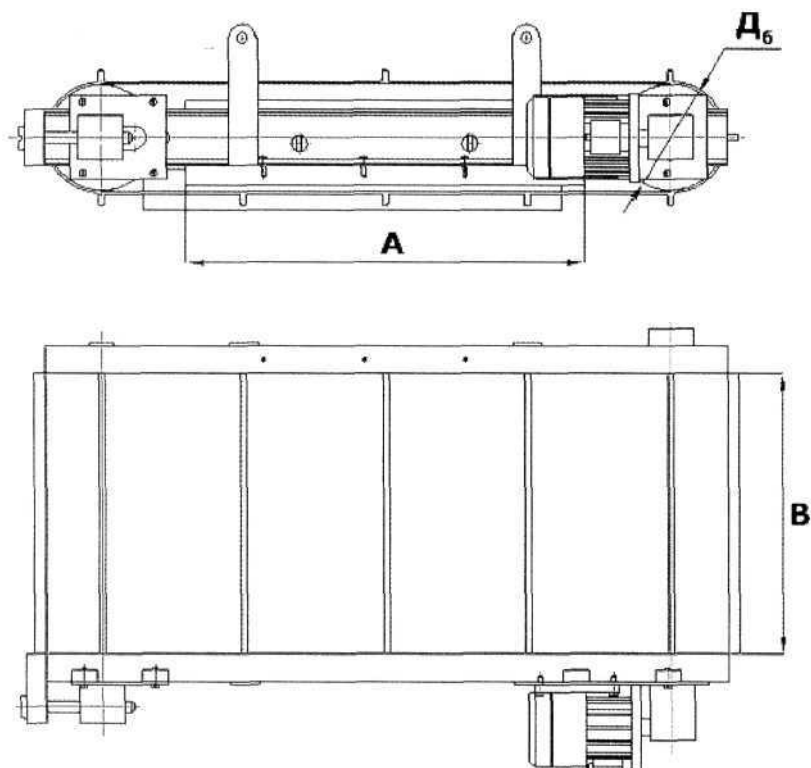






| Модель сепаратора | Ширина конвейерной ленты А | Длина магнитной системы В | Высота магнитной системы Н |
|-------------------|----------------------------|---------------------------|----------------------------|
| СМПР 500 х 600    | 500                        | 600                       | 200                        |
| СМПР 650 х 600    | 650                        | 600                       | 260                        |
| СМПР 800 х 650    | 800                        | 650                       | 320                        |
| СМПР 1000 х 700   | 1000                       | 700                       | 240                        |
| СМПР 1200 х 700   | 1200                       | 700                       | 480                        |
| СМПР 1400 х 800   | 1400                       | 800                       | 560                        |
| СМПР 1600 х 800   | 1600                       | 800                       | 640                        |
| СМПР 1800 х 1000  | 1800                       | 1000                      | 720                        |
| СМПР 2000 х 1200  | 2000                       | 1200                      | 800                        |

магнитной системы. Приводной барабан имеет автономный регулируемый привод вращения. Лента транспортера выполнена из высокопрочного каучука. Для устранения провисания транспортной ленты на раме под лентой монтируется панель из текстолита. Для предупреждения сползания ленты с барабанов в осевом направлении установлены два конечных выключателя, отключающих вращение барабана и магнитного ротора при осевом перемещении ленты транспортера.



| Модель сепаратора | Ширина конвейерной ленты | Габаритные размеры        |                            |                             |
|-------------------|--------------------------|---------------------------|----------------------------|-----------------------------|
|                   |                          | Длина магнитной системы А | Ширина магнитной системы В | Диаметр приводного барабана |
| СМПА 500 х 320    | 500                      | 400                       | 320                        | 200                         |
| СМПА 650 х 440    | 650                      | 550                       | 440                        | 260                         |
| СМПА 800 х 560    | 800                      | 700                       | 560                        | 320                         |
| СМПА 1000 х 720   | 1000                     | 900                       | 720                        | 400                         |
| СМПА 1200 х 880   | 1200                     | 1100                      | 880                        | 480                         |
| СМПА 1400 х 960   | 1400                     | 1200                      | 960                        | 560                         |
| СМПА 1600 х 1120  | 1600                     | 1400                      | 1120                       | 640                         |
| СМПА 1800 х 1280  | 1800                     | 1600                      | 1280                       | 720                         |
| СМПА 2000 х 1440  | 2000                     | 1800                      | 1440                       | 800                         |

## ТЕХНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

- Максимальная индукция на поверхности магнитных блоков при  $t=20(^{\circ}\text{C})$  до 400(мТл);
- Максимальная рабочая температура не более  $80(^{\circ}\text{C})$ ;
- Материал магнитной системы  $Nd-Fe-B$ ,  $(BH)_{\text{max}} 280 \text{ кДж/м}^3$ ;
- Очистка магнитного сепаратора — автоматическая;
- Максимальная высота установки над конвейером — 250 мм;

- Габаритные размеры — по требованию заказчика;
- Производительность до 500 т/час.

## Сепаратор магнитный — серия БСМ

В настоящее время научно-производственной компанией "ЭРГА" разработаны и успешно внедрены в производство магнитные сепараторы серии БСМ для улавливания металлических частиц из гранулированного материала, а также из свободно падающего материала обычной формы.

### НАЗНАЧЕНИЕ:

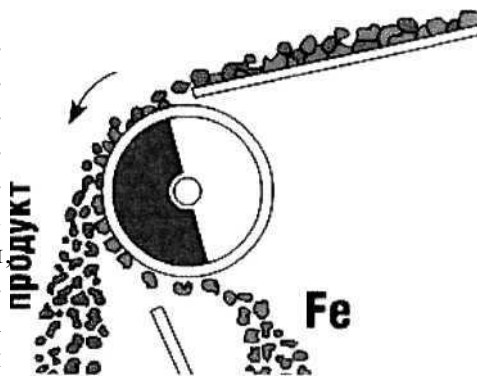
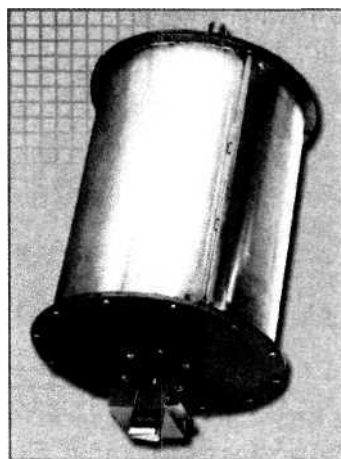
Сепаратор магнитный БСМ предназначен для высококачественного удаления слабомагнитных и ферромагнитных металлических частиц из гранулированных, сыпучих и жидких материалов.

### УСТАНОВКА:

Барабанные сепараторы обычно располагаются в точке выгрузки желоба, конвейера, вибропитателя или аналогичных перевалочных машин. Магнитные барабанные сепараторы специально спроектированы для работы в сложных условиях.

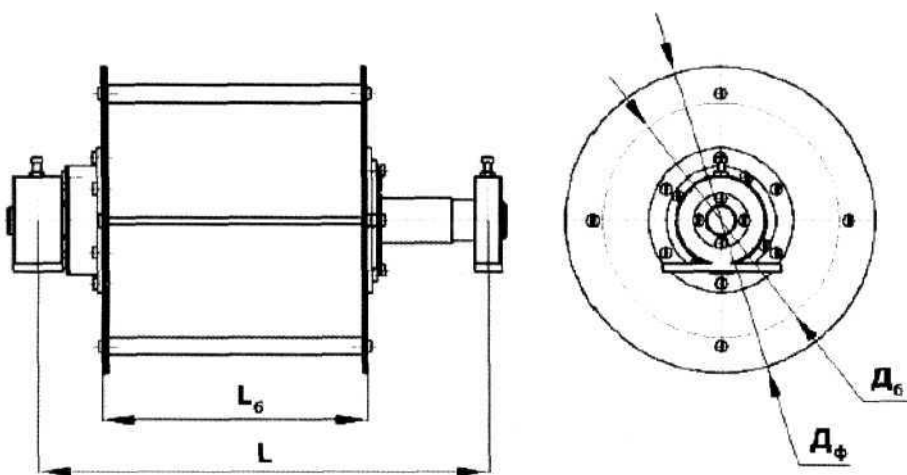
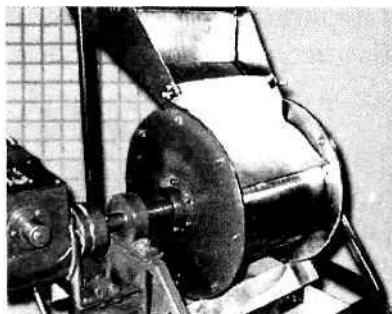
### ПРИНЦИП РАБОТЫ:

В основу работы сепаратора положен принцип извлечения магнитных примесей из гранулированных, сыпучих и жидких материалов с помощью магнитного поля, создаваемого постоянными магнитами, изготовленными на основе редкоземельных металлов. В момент соприкосновения материала с барабаном начинается его сепарация. Под действием мощного магнитного поля ферромагнитные частицы притягиваются к поверхности барабана и удерживаются на нем до момента поворота барабана более чем на 180°, затем магнитное поле исчезает и ферромагнитные частицы опадают в специальный ящик — накопитель. Очищенный материал по касательной барабана подается в контейнер.



### ТЕХНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ:

- Максимальная индукция на поверхности магнитных блоков при  $t=20(^{\circ}\text{C})$  до 700 (мТл);
- Максимальная рабочая температура до 130 ( $^{\circ}\text{C}$ );
- Материал магнитной системы  $\text{Nd-Fe-B}$ ,  $(\text{BH})_{\text{max}}$  290 кДж/м<sup>3</sup>;
- Очистка магнитного сепаратора — автоматическая;
- Мотор-редуктор — по требованию заказчика;
- Габаритные размеры — по требованию заказчика;
- Производительность до 100 т/час.



| Модель сепаратора | Производительность<br>$Q$ м <sup>3</sup> /час | Диаметр<br>барабана $D_6$ | Длина<br>барабана $L_6$ | Диаметр фланца<br>$D_{\Phi}$ |
|-------------------|-----------------------------------------------|---------------------------|-------------------------|------------------------------|
| БСМ 250 х 150     | до 0.5                                        | 250                       | 150                     | 350                          |
| БСМ 250 х 250     | до 1                                          | 250                       | 250                     | 350                          |
| БСМ 300 х 300     | до 5                                          | 300                       | 300                     | 400                          |
| БСМ 400 х 400     | до 10                                         | 400                       | 400                     | 500                          |
| БСМ 500 х 500     | свыше 10                                      | >500                      | >500                    | >500                         |

## Сепаратор магнитный — серия СМБ

В настоящее время научно-производственной компанией "ЭРГА" разработаны и успешно внедрены в производство магнитные сепараторы серии СМБ для сепарации различных материалов транспортируемых по конвейеру.

### НАЗНАЧЕНИЕ:

Сепаратор магнитный СМБ предназначен для высококачественного удаления слабо-магнитных и ферромагнитных металлических частиц из гранулированных сыпучих материалов транспортируемых по конвейеру.

### УСТАНОВКА

Устанавливается вместо приводного барабана конвейера в условиях, когда невозможно использовать отдельный магнитный сепаратор СМБМ.

### ПРИНЦИП РАБОТЫ

В основу работы сепаратора положен принцип извлечения магнитных примесей из гранулированных сыпучих материалов с помощью магнитного поля, создаваемого постоянными магнитами на основе редкоземельных металлов. В момент соприкосновения материала с барабаном через ленту конвейера начинается его сепарация. Под действием мощного магнитного поля ферромагнитные частицы притягиваются к поверхности барабана и удерживаются там до момента выхода транспортной ленты с поверхности барабана, в результате чего магнитное поле исчезает и ферромагнитные частицы опадают в специальный контейнер. Очищенный материал по касательной барабана подается на производство.

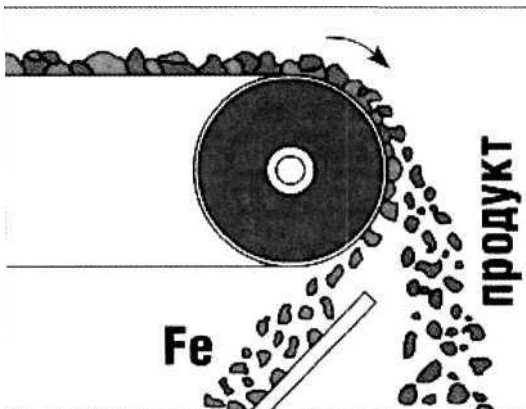


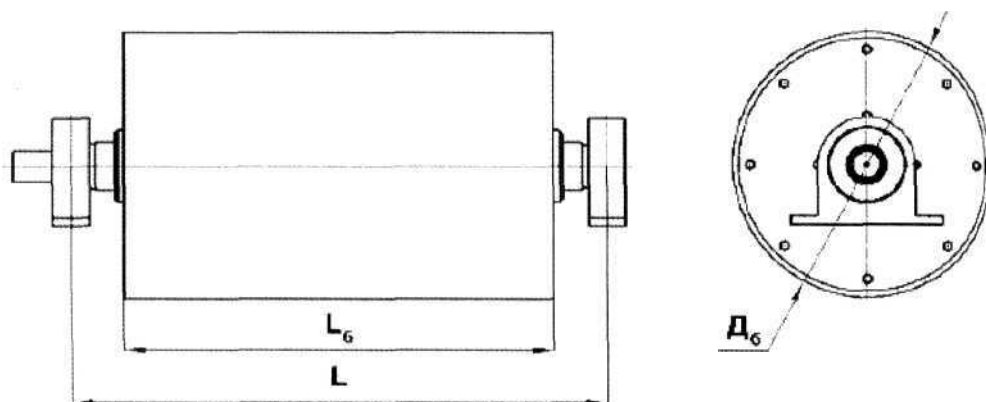
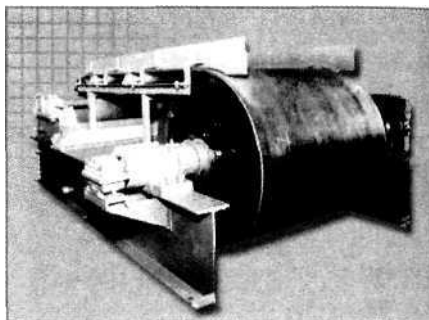
Схема 1. Принцип работы СМБ.

### ТЕХНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ:

- Максимальная индукция на поверхности магнитных блоков при  $t=20(^{\circ}\text{C})$  до 500 (мТл);
- Максимальная рабочая температура не более 100 ( $^{\circ}\text{C}$ );
- Материал магнитной системы  $Nd-Fe-B$ ,  $(BH)_{\text{max}} 270 \text{ кДж/м}^3$ ;

- Очистка магнитного сепаратора — автоматическая;
- Габаритные размеры из числа стандартных или по индивидуальному заказу;
- Производительность — до 300 т/час.

Сепараторы являются пожаро-взрывобезопасными изделиями, что позволяет их использовать в сложных условиях, требующих строгого соблюдения норм безопасности.



| Модель сепаратора | Ширина конвейерной ленты | Диаметр барабана $D_6$ | Длина барабана $L_6$ |
|-------------------|--------------------------|------------------------|----------------------|
| СМБ 250 х 400     | 400                      | 250                    | 500                  |
| СМБ 300 х 500     | 500                      | 300                    | 600                  |
| СМБ 400 х 650     | 650                      | 400                    | 750                  |
| СМБ 500 х 700     | 700                      | 500                    | 800                  |
| СМБ 500 х 800     | 800                      | 500                    | 900                  |
| СМБ 500 х 1000    | 1000                     | 500                    | 1100                 |
| СМБ 600 х 1200    | 1200                     | 600                    | 1300                 |
| СМБ 600 х 1400    | 1400                     | 600                    | 1500                 |
| СМБ 600 х 1600    | 1600                     | 600                    | 1700                 |
| СМБ 600 х 1800    | 1800                     | >600                   | >1900                |

## Сепаратор магнитный — серия СМБМ

В настоящее время научно-производственной компанией "ЭРГА" разработаны и успешно внедрены в производство модульные системы магнитной сепарации серии СМБМ для улавливания металлических частиц из гранулированного материала.

### НАЗНАЧЕНИЕ

Модульные системы магнитной сепарации предназначены для высококачественного удаления слабомагнитных и ферромагнитных металлических частиц из гранулированных сыпучих и жидких материалов.

### УСТАНОВКА

Модульные системы обычно применяют в тех местах, где присутствует возможность установки нового оборудования в существующую технологическую линию с небольшими конструктивными доработками.

### ПРИНЦИП РАБОТЫ

Основу сепаратора составляет магнитный барабан, который имеет следующую конструкцию: постоянные магниты  $Nd-Fe-B$  закреплены по диаметру барабана на угол равный  $160^\circ$ . Данный барабан крепится неподвижно на раме. Второй барабан большего диаметра производит вращение вокруг неподвижного барабана. Подвижный барабан, выполненный из нержавеющей стали 12Х18Н10Т, приводится во вращение с помощью мотор-редуктора, который состоит из электрического двигателя и червячного редуктора.

### ТЕХНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ:

- Максимальная индукция на поверхности магнитных блоков при  $t=20(^\circ C)$ , до 700 (мТл);
- Максимальная рабочая температура до  $130(^\circ C)$ ;
- Материал магнитной системы --  $Nd-Fe-B$ ,  $(BH)_{max}$  290 кДж/м<sup>3</sup>;
- Очистка магнитного сепаратора — автоматическая;
- Мотор-редуктор — выбирается по требованию заказчика из числа стандартных, возможен с электрическим управлением;
- Производительность — от 10 кг до 100 т/час;

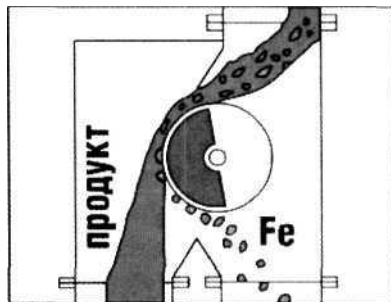
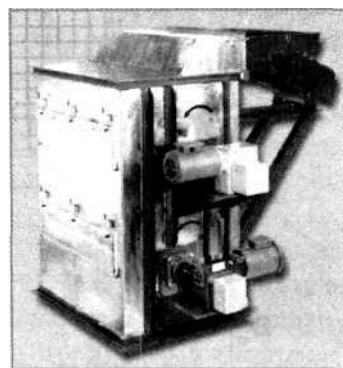
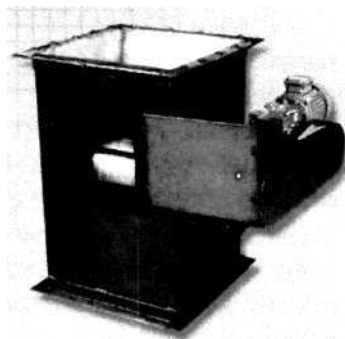
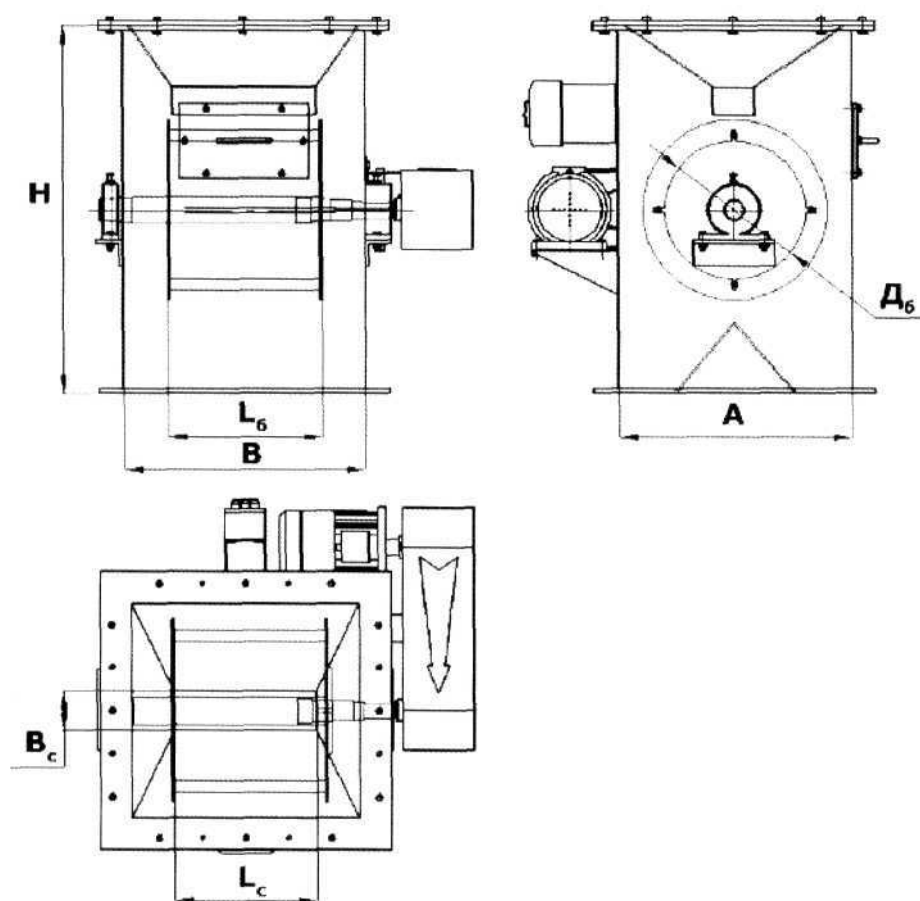


Схема 1. Принцип работы  
МСС



| Модель сепаратора | Производительность<br>Q, м³/час | Габаритные размеры |      |      |      |      |      |      |
|-------------------|---------------------------------|--------------------|------|------|------|------|------|------|
|                   |                                 | A                  | B    | H    | D6   | Lb   | Lc   | Bc   |
| СМБМ 250 х 150    | до 0,5                          | 390                | 280  | 550  | 250  | 150  | 100  | 50   |
| СМБМ 250 х 250    | до 1                            | 390                | 380  | 550  | 250  | 250  | 200  | 50   |
| СМБМ 300 х 300    | до 5                            | 500                | 430  | 600  | 300  | 300  | 250  | 70   |
| СМБМ 400 х 400    | до 10                           | 600                | 530  | 700  | 400  | 400  | 350  | 100  |
| СМБМ 400 х 500    | свыше 10                        | >600               | >630 | >700 | >400 | >500 | >350 | >100 |

Сепараторы являются пожаро-взрывобезопасными изделиями, что позволяет их использовать в сложных условиях, требующих строгого соблюдения норм безопасности.



## 6.4. Применение магнитов в рекламном деле

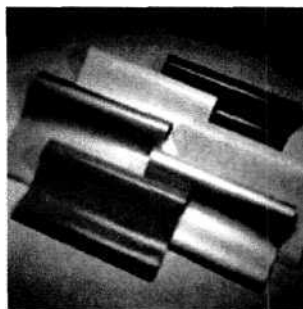
Магнитные полимерные материалы нашли широкое применение в технике, быту и, конечно же, в рекламе. Но для нашей страны этот вид материалов - относительно новый, поэтому есть смысл рассказать о нем подробнее.

Для начала небольшой экскурс в историю. Полимерные магниты были изобретены Максом Байерманом в 1934 г. благодаря постигшей его неудаче с хрупким постоянным магнитом, изготовленным из сплава алюминия, никеля и кобальта. Этот магнит упал на пол и разбился на множество мелких кусочков. Не имея времени изготовить новый, Байерман решил склеить кусочки. Магнитные свойства склеенного магнита оказались достаточно хорошими, что привело к идее изготовления постоянных магнитов из смеси магнитного порошка и связующей полимерной компоненты. В дальнейшем выяснилось, что эти магниты имеют существенные преимущества по сравнению с обычными металлическими или керамическими магнитами, получаемыми спеканием. Среди них — высокая воспроизводимость и стабильность магнитных свойств; большой срок службы; возможность легко и значительно дешевле получать изделия сложной формы; высокая точность соблюдения заданных размеров; хорошая механическая прочность и пластичность; устойчивость к коррозии; небольшой вес.

Различают гибкие и жесткие (негибкие) полимерные магниты. Изделия из гибких полимерных магнитных материалов (ГПММ) изготавливаются каландрированием и экструзией. Исходная смесь включает в себя магнитный порошок (70-75% от полного объема), соответствующий полимерный материал, антиокислители и при необходимости пластификаторы. Каландрирование - многоступенчатая прокатка нагретой смеси исходных компонентов через систему металлических валков. В результате получается гибкий полимерный магнитный лист темно-коричневого цвета. В процессе же экструзии нагретая смесь исходных компонентов продавливается через головку с профилирующим каналом заданной формы, в результате чего получают гибкие магнитные полимерные профили (рис. 6.4.1).



1.



2.

Рис.6.4.1

Одна из сторон листового материала может ламинироваться виниловым белым или цветным (коричневого, оранжевого, желтого, голубого, зеленого, хромового, серебряного, черного, красного и серого цветов) покрытием (рис. 2), покрываться бумагой или клеевым слоем для применения внутри и вне помещений.

В США производятся ГПММ стандартных толщин: 0,254; 0,38; 0,508; 0,635; 0,762; 1,143 и 1,534 мм. Листовые ГПММ могут поставляться в рулонах со стандартной шириной 622 мм и длиной до 60,96 м.

ГПММ обладают хорошими механическими свойствами и, вместе с тем, легко обрабатываются традиционными механическими способами (штамповка, резка, обработка абразивными инструментами). Обычный диапазон температур применения от  $-40$  до  $+70$  °С, а максимально возможная температура  $+80$  °С: в современных ГПММ нет компонентов, которые могут приводить к растрескиванию.

Приведем в качестве примера листовой ГПММ марки Ultramag фирмы Flexmag Industries, Inc. (США). При комнатной температуре его можно без поломки обернуть вокруг стержня с минимальным диаметром 5 см. При обработке материала используют штамповку, материал можно резать обычными ножницами. Плотность материала -- 3,8 г/см<sup>3</sup> (это типичное значение для гибких магнитных полимерных материалов).

Отметим, что материал, выходящий непосредственно из профилирующего канала при экструзии или из валиков при каландрировании, не обладает намагниченностью: вектора намагниченности отдельных частичек магнитного порошка распределены в пространстве в исходном состоянии хаотически. Поэтому при производстве материал намагничивают постоянными магнитными полями заданной конфигурации. Обычно намагничивается одна сторона листового материала и плоская поверхность профиля (конфигурации магнитных полюсов в случае профилей сложной формы, например, трубок, мы рассматривать не будем). Профили прямоугольного сечения могут намагничиваться также по толщине и по ширине.

Но наиболее широко используемая конфигурация намагниченности — (в основном применяется для листовых материалов и профилей) — многополюсная, показанная на рис. 6.4.2 (здесь S — это южный магнитный полюс, а N — северный). При этом на поверхности материала чередуются северный и южный магнитные полюса, а силовые линии магнитного поля расположены параллельно поверхности. Это позволяет значительно увеличить силу, с которой намагниченный полимерный лист или профиль притягивается к поверхности материала, обладающего магнитными свойствами, и обеспечивает его надежное крепление на ней. Обычно применяется многополюсная конфигурация с пятью полюсами на 1 см. Ширина полюса составляет 0,2 см, но возможны конфигурации с двумя и четырьмя полюсами на 1 см. Общее правило таково: чем больше число полюсов на 1 см, тем выше интенсивность магнитного поля у поверхности материала, но тем быстрее она уменьшается при удалении от материала (см. распределение магнитного поля на поверхности Ultramag<sup>TM</sup>).

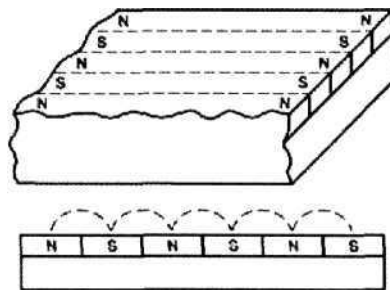


Рис.6.4.2.

Важный параметр гибких листовых полимерных магнитов — это удерживающая сила. Она определяется как сила, необходимая для удаления с магнитной поверхности материала стального диска единичной площади вертикально вверх. У листовых ГПММ этот параметр лежит в пределах от 20 до 80 г/см<sup>2</sup>. У более толстого материала величина удерживающей силы больше и уменьшается с уменьшением толщины.

Рассмотрим типичные магнитные характеристики ГПММ на примере продукции фирмы Flexmag Industries, Inc. (США), выпускающей материалы UltraMag, SafeMag и ThinMag. Листы UltraMag и SafeMag — толщиной от 0,38 мм, а листы ThinMag -- 0,25 мм, причем UltraMag применяется также для изготовления гибких профильных изделий. Листовой материал SafeMag имеет на намагниченной стороне дополнительное тонкое гляцевое покрытие, не ухудшающее магнитных свойств. В качестве полимерной связки в этих материалах используется хайпалон (сульфохлорированный полиэтилен), а в качестве магнитной компоненты — стронциевый феррит.

Удерживающая сила при комнатной температуре листового материала UltraMag толщиной 0,76 мм - - 42,5 г/см . Она убывает при уменьшении толщины до 0,5 мм до величины 30 г/см . С увеличением температуры удерживающая сила уменьшается на 5% на каждые 10 градусов вплоть до максимально возможной температуры эксплуатации +80°C. В изделиях марок UltraMag, SafeMag и ThinMag применяются стандартные составы FM-3 и FM-4 - их магнитные характеристики приведены в Табл.1.

Таблица 1

| Состав | Br, Гс | Hci, Э | (BH) <sub>max</sub> , МГсЭ |
|--------|--------|--------|----------------------------|
| FM-3   | 1700   | 2250   | 0,6                        |
| FM-4   | 1700   | 2200   | 0,6                        |
| FM-10  | 2000   | 2900   | 0,9                        |
| FM-12  | 2250   | 3250   | 1,2                        |

Здесь  $B_r$  — это остаточная намагниченность (измеряется в гауссах),  $H_{ci}$  — это коэрцитивная сила (измеряется в эрстедах),  $(BH)_{max}$  — энергетическое произведение, чем больше его величина, тем "сильнее" магнит, тем более интенсивно он способен притягивать к себе (или удерживать на своей поверхности) магнитные материалы. Составы FM-10 и FM-12 (табл. 1) отличаются улучшенными энергетическими параметрами из-за применения специальных добавок и технологических режимов и имеют более высокую цену, чем стандартные продукты. Магнитные характеристики ГПММ достаточно стабильны и практически не изменяются при воздействии вибраций, ударов, полей различных электромагнитных помех.

Каковы же возможные применения ГПММ в рекламных технологиях? Среди них -- транзитная реклама, организация выставочных мероприятий, изготовление рекламных стендов, оформление мест продаж, разного рода информационные знаки и панели, указатели и таблички, всевозможные магнитные наклейки, стакеры, рекламная сувенирная продукция, календари на магнитной основе, магнитные сувениры и прочая мобильная магнитная наружная реклама.

На сегодняшний день для транзитной рекламы (рекламы на автотранспорте) используются самоклеющиеся пленки с нанесенными на них соответствующими изображениями, укрепляемые на кузовах транспорта. Такие же самоклеющиеся пленки можно наносить не непосредственно на кузов автомобиля, а на гибкие магнитные полимерные листы. Это позволит проводить сложные монтажи в специально оборудованном помещении, а не в гараже. Кроме того, можно снимать рекламный знак или быстро заменять его другим. Особенно важно это для предприятий малого бизнеса, где один автомобиль часто используют для различных нужд. Значительная площадь рекламного знака на магнитной основе и достаточно большая величина удерживающей силы магнитного материала обеспечивают ему надежное крепление на стальном кузове движущегося транспортного средства (рис. 6.4.3).

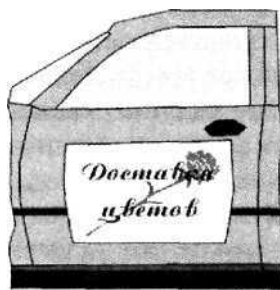


Рис.6.4.3.

Часто при организации выставок, изготовлении мобильных рекламных стендов и оформлении мест продаж возникает потребность в прочном, но быстросъемном креплении информационных панелей. Профили различного сечения из ГПММ, начиная от обычного прямоугольного до достаточно сложных конфигураций (рис. 6.4.4),

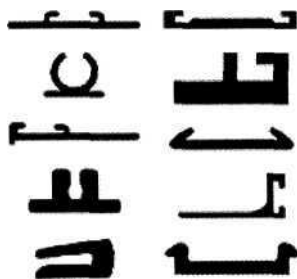


Рис.6.4.4.

могут оказать при этом значительную помощь.

Рассмотрим, например, стандартное изделие — гибкую полимерную магнитную полосу фирмы Flexmag Industries, Inc. из материала UltraMag FM-4. Она бывает узкая (шириной 12,7 мм) и широкая (шириной 25,4 мм) толщиной 1,5 мм. Намагничена одна из широких сторон полосы, причем плотность магнитных полюсов составляет 3,5 на 1 см. Различают 2 типа полосок — Аи В, намагниченные таким образом, что полоска типа А при соединении с полоской типа В становится точно по ширине (если используется узкая и широкая полоски, то на широкую полосу помещаются 2 узкие). Немагнитная поверхность полосы покрыта самоклеющимся покрытием, закрытым тонкой защитной пленкой. Укрепив полоски с помощью самоклеющегося покрытия соответственно на стенде и плакате, получаем возможность легко и быстро установить нужный плакат или при необходимости сменить его. Преимущество такого "магнитного соединения" — в практически неограниченном числе возможных циклов соединение — разъединение, лёгкости и скорости использования, отсутствии необходимости применения инструментов (кроме ножниц для того, чтобы отрезать полосу необходимой длины).

Можно также обычными методами укрепить на поверхности стенда другое полезное изделие -листовой материал FerroSheet (толщина 0,635 мм). Этот материал сам по себе не намагничен, но, благодаря наличию в своем составе магнетита  $Fe_3O_4$ , он, подобно стальному листу, удерживает на своей поверхности намагниченные материалы. Плакаты на стенде с материалом FerroSheet можно укреплять с помощью магнитной полосы или прижимая их постоянными магнитами. На таком стенде легко размещать изделия из ГПММ. FerroSheet можно заламинировать виниловым покрытием, включая покрытие, допускающее многократное стирание написанного.

Так называемый С-профиль используется для закрепления в нем информационных или визитных карточек — рис. 6.4.5. Выпускаются С-профили с различной шириной канала (в частности, фирмой Flexmag Industries, Inc. — от 9,5 до 47 мм), в которые можно помещать карточки толщиной до 0,8 мм.



Рис.6.4.5.

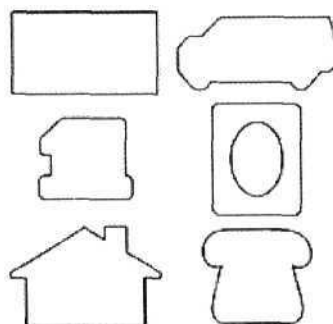
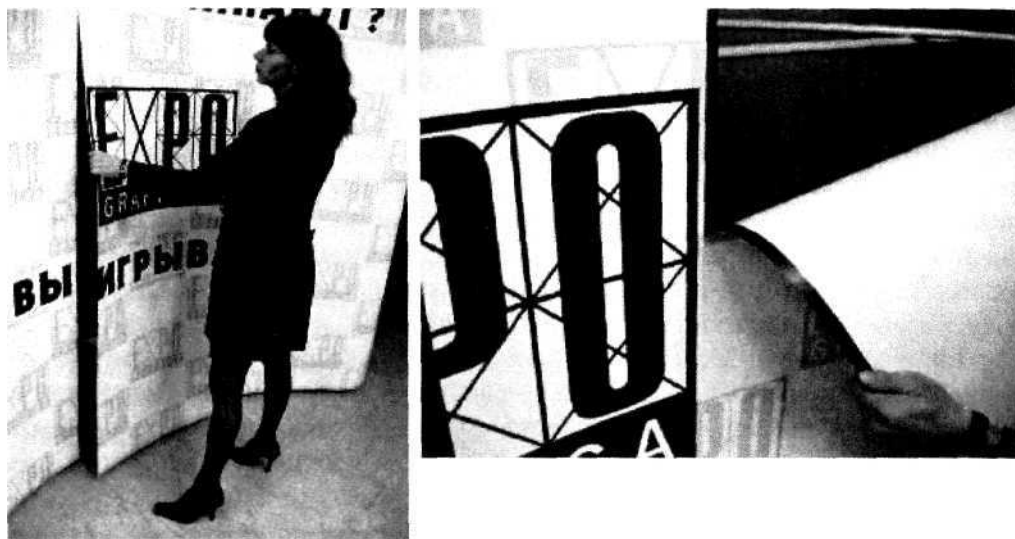


Рис.6.4.6.

Следующая область применения гибких магнитов — это рекламная сувенирная продукция с длительным сроком службы. Такие изделия могут использоваться на выставках, презентациях, переговорах, конференциях, для продвижения товара на рынок. На рис. 6.4.6 представлены образцы изделий, наиболее широко используемых в рекламной практике США (вырубка штампом из листовых ГПММ). Здесь показаны: визитная карточка, автомобиль, цифра "1", рамка для фотографий, домик и телефон. На изделиях выполняются надписи и рисунки рекламного и информационного характера. Разумеется, каждый может придумать свою форму для рекламы своего товара, фирмы или услуги.

Печатают изображения непосредственно на ламинированном виниле листовом ГПММ методами термографии, шелкографии или тиснения. Возможна также печать на полимерной пленке с последующим покрытием ею неламинированного листа ГПММ. Можно также печатать на бумажном листе обычными методами, а затем укреплять его на ГПММ с самоклеющимся покрытием.



Магнитная лента обеспечивает качественное монтажное соединение стыков, надежную фиксацию и быстрый крепеж плакатов.

Одна часть ленты (Тип В) клеится на несущую алюминиевую конструкцию, другая часть (Тип А) клеится к плакату.

После этого можно производить быстрый (многократный) монтаж и демонтаж всего стенда.

В заключение следует отметить, что приведенными примерами возможности ГПММ в области рекламных технологий далеко не исчерпываются и при соответствующей фантазии могут быть существенно расширены.

## 6.5. Использование магнитов в стройиндустрии

Все мы с детства знаем легенду об уральской магнитной горе, к которой прилипали стрелы кочевников. Если пофантазировать и предположить, что эта гора была бы из магнита на основе неодимового сплава (неодим-железо-бор), то она, наверняка, притягивала бы к себе пролетающие мимо стальные самолеты. Именно из порошка  $Nd-Fe-B$  в конце прошлого века научились спекать качественно новые постоянные магниты. Этот материал по праву может называться материалом 21-го века. Он вобрал в себя все достижения в этой области, огромные усилия больших и малых научных коллективов и побил все рекорды магнитных характеристик.

За рубежом устройства на основе неодимовых магнитов сразу же нашли применение, практически, во всех областях. Помимо традиционных потребителей новейших материалов — военно-промышленного комплекса и ядерной промышленности, в их число входят стройиндустрия и нефтегазовый комплекс, химическая и металлургическая промышленность, медицина и микробиология, теплоэнергетика и машиностроение, деревообрабатывающая и пищевая промышленность, радиоэлектроника и наружная реклама. Это далеко не полный список областей применения этих магнитов.

Спектр устройств на постоянных магнитах чрезвычайно широк, но можно попытаться выделить основные классы магнитных систем. Первый класс — это подъемно-транспортное и погрузочно-разгрузочное оборудование на основе постоянных магнитов. В статье про неодимовые магниты был приведен следующий пример: "...магнит размером с футбольный мяч легко поднимает "Волгу"..." . Наглядно. Хочется добавить: "с пассажирами и полным багажником". Представляете, каких размеров должен быть электрический магнит с такой же грузоподъемностью? Раз в 20 больше. Существуют, также, ручные и полуавтоматические подъемно-транспортные приспособления, помогающие избежать травм и увечий при погрузке, разгрузке и транспортировке. Другой класс — это сепарационные системы, использующиеся на горно-обогатительных предприятиях, сепараторы для сыпучих и текучих веществ, устанавливаемые обычно в трубопроводах или над конвейерами (т. н. линии магнитной задержки) для различных предприятий стройиндустрии, пищевой, химической промышленности, предприятий по утилизации промышленного, бытового и строительного мусора. В третий класс изделий можно отнести роторы двигателей и микродвигателей, тормозные системы, герметичные муфты и т. д. В отдельный класс можно выделить установки, где неодимовые магниты используются как различного рода магнитные линзы для фокусировки, отклонения заряженных частиц в радиоэлектронике, в некоторых областях науки, в медицине (томографы, ЯМР-спектрометры).

Практически везде, где есть конвейеры, стоит проблема попадания металломагнитных примесей в потенциально опасные отсеки оборудования. На предприятиях строительной индустрии (ЖБК, заводах ЖБИ и сухих смесей и т.д.) отсутствие магнитного заграждения приводит "всего лишь" к поломкам и

/\*-/\*-  
-\*

монтажу дорогостоящего оборудования (лопастям, насосам, весовым механизмам и т.д.) или ухудшению качества выпускаемой продукции (например, на предприятиях стекольной и керамической промышленности). В животноводстве же, и пищевой промышленности это зачастую приводит к летальным исходам. В первом случае гибнет скот от попадающих в комбикорма и добавки гвоздей и шурупов, а во втором — люди от взрывов. Так из-за попадания в норию крупных металломагнитных примесей в 1971-89гг. произошли взрывы на Иркутском и Саранском комбикормовых заводах, Белогорском, Читинском и Армавирском комбинатах хлебопродуктов. Таким образом, существует очевидная потребность в таких изделиях у предприятий, представляющих не только строительную индустрию.

На западе внедрение сильных магнитов в повседневную жизнь (вплоть до бытовых магнитов, игрушек для детей и даже украшений) произошло так же быстро, как на смену виниловым грампластинкам пришли компакт-диски. К сожалению, отечественный потребитель, если воспользоваться этим же сравнением, продолжает слушать граммофон. Справедливости ради, нужно отметить, что некоторые предприятия строительной, нефтегазовой, деревообрабатывающей промышленности уже успешно используют новую технику на постоянных магнитах, но доля этих предприятий ничтожно мала по сравнению с общим количеством нуждающихся в этой технике.

И, что самое парадоксальное, дело здесь не в конкурентоспособности этих устройств. Конкурентов у этих изделий, попросту, нет. Они компактней, безопасней, не требуют затрат электроэнергии, а главное, дешевле применяемых сегодня электромагнитных систем. Те изделия, которые не требуют электропитания для вспомогательных блоков могут работать в поле, под землей и под водой, днем и ночью - - постоянно! В связи с этим, даже возобновились дискуссии о разного рода идеях вечных двигателей, летательных аппаратах, использующих альтернативные принципы. Быть может, это уже не за горами. Но, оказывается, можно упорно отвергать даже то, чем уже пользуется весь мир.

Несмотря на инертность отечественного рынка, смотреть в будущее нужно с оптимизмом. На самом деле в нашей стране существуют предпосылки развития техники на постоянных сильных магнитах. Есть предприятия как старые, в основном ВПК, сумевшие "выжить" в сложный переходный период+

не потерять людей и накопленные знания, так и новые образованные на базе



комнатных температур, чрезвычайно актуальна в настоящее время. Это обусловлено целым рядом серьезных претензий к ныне действующим охлаждающим системам. Известно, в частности, что при эксплуатации используемых в настоящее время возможны утечки рабочих газов (хладагентов), вызывающих такие серьезные экологические проблемы как разрушение озонового слоя и глобальное потепление. Среди разнообразных альтернативных технологий, которые могли бы использоваться в холодильных устройствах, все большее внимание исследователей во всем мире привлекает технология магнитного охлаждения. Интенсивные работы, посвященные магнитному охлаждению, ведутся во многих лабораториях и университетах Европы, США, Канады, Китая и России. Магнитный холодильник экологически безопасен и позволяет значительно снизить потребление электроэнергии. Последнее обстоятельство чрезвычайно важно с учетом поистине огромного количества холодильных установок, используемых человеком в самых различных областях его деятельности.

Технология магнитного охлаждения основана на способности любого магнитного материала изменять свою температуру и энтропию под воздействием магнитного поля, как это происходит при сжатии или расширении газа или пара в традиционных холодильниках. Такое изменение температуры или энтропии магнитного материала при изменении напряженности магнитного поля, в котором он находится, называется магнитокалорическим эффектом (МКЭ). Изменение температуры магнитного материала происходит в результате перераспределения внутренней энергии магнитного вещества между системой магнитных моментов его атомов и кристаллической решеткой. Максимальной величины МКЭ достигает в магнитоупорядоченных материалах, таких как ферромагнетики, антиферромагнетики и т.п., при температурах магнитных фазовых переходов (температурах магнитного упорядочения — Кюри, Нееля и т.д.). Главное преимущество аппаратов для магнитного охлаждения связано с высокой плотностью материала — твердого тела — по сравнению с плотностью пара или газа. Изменение энтропии на единицу объема в твердых магнитных материалах в 7 раз выше, чем в газе. Это позволяет делать значительно более компактные холодильники, используя в качестве рабочего тела магнитный материал. Само магнитное рабочее тело служит аналогом хладагентов, используемых в традиционных парогазовых холодильных установках, а процесс размагничивания-намагничивания — аналогом циклов сжатия — расширения.

Эффективность работы холодильника главным образом определяется количеством необратимой работы, производимой в течение цикла — для эффективных устройств оно должно быть как можно ниже. В газовом рефрижераторе существуют устройства, производящие значительное количество необратимой работы — это регенератор, компрессор и теплообменники. Значительная часть необратимой работы производится в теплообменниках — она прямо пропорциональна адиабатическому изменению температуры рабочего тела, которое значительно больше в газе, чем в магнитном материале. По этой причине

наиболее эффективный отвод тепла происходит в магнитном холодильном цикле, особенно в регенеративном. Специальная конструкция теплообменника и использование регенератора с большой площадью поверхности позволяют добиться малой доли необратимой работы при магнитном охлаждении. В соответствии с теоретическими оценками эффективность магнитного регенеративного холодильного цикла в температурном диапазоне от 4.5 до 300 К может составлять от 38 до 60 % эффективности цикла Карно (около 52 % в интервале температур от 20 до 150 К, и около 85% в интервале от 150 до 300 К). При этом на всех этапах цикла условия теплопередачи будут наиболее совершенными из известных. Кроме того, магнитные холодильники включают в себя небольшое количество движущихся деталей и работают при низких частотах, что позволяет свести к минимуму износ холодильника и увеличить время его эксплуатации.

### **Хронология проблемы. Основные принципы магнитного охлаждения**

МКЭ был открыт сравнительно давно (в 1881 году) Е. Варбургом (E. Warburg). Варбург наблюдал, как под действием магнитного поля железный образец нагревался или охлаждался. Ученый сделал вывод о том, что изменение температуры образца есть следствие изменения внутренней энергии вещества, обладающего магнитной структурой, под действием поля. Однако до практического использования этого явления было еще далеко. Ланжевэн (Langevin, 1905) был первым, кто продемонстрировал, что изменение намагниченности парамагнетика приводит к обратимому изменению температуры образца.

Собственно магнитное охлаждение было предложено спустя почти 50 лет после открытия МКЭ независимо двумя американскими учеными Петером Дебаем (Peter Debye, 1926) и Уильямом Джоком (William Giauque, 1927) как способ достижения температур ниже точки кипения жидкого гелия. Джоки и МакДугалл были первыми, кто продемонстрировал простейший эксперимент по магнитному охлаждению в 1933 году. (Чуть позже это сделали также де Гааз (de Haas, 1933) и Курти (Kurti, 1934). В ходе этого эксперимента удалось достичь температуры 0.25 К, а в качестве теплоотводящей субстанции использовался накачиваемый жидкий гелий при температуре 1.5 К. Таблетка с магнитной солью находилась в состоянии теплового равновесия с теплоотводящим веществом, пока в соленоиде существовало сильное магнитное поле. Когда же соленоид разряжался, магнитная таблетка термически изолировалась и её температура понижалась. Такая техника, называемая охлаждением адиабатическим размагничиванием, является стандартной лабораторной техникой, применяемой для получения сверхнизких температур. Однако, мощность такого рефрижератора и его рабочий интервал температур слишком малы для промышленных применений.

Более сложные методы, включающие в себя тепловую регенерацию и циклические изменения магнитного поля, были предложены в 60-х годах

прошлого столетия. Дж. Браун из НАСА в 1976 году продемонстрировал регенеративный магнитный холодильник, действующий уже вблизи комнатной температуры с рабочим интервалом температур в 50 К. Мощность холодильника и его эффективность и в этом случае были низкими, поскольку температурный градиент необходимо было поддерживать путем перемешивания теплоотводящей жидкости, а время, необходимое для зарядки и разрядки магнита было слишком большим. Небольшие маломощные холодильные устройства были построены в 80-х-90-х годах сразу в нескольких исследовательских центрах: Los Alamos National Lab, the Navy Lab at Annapolis, Oak Ridge National Lab, Astronautics (все США), Toshiba (Япония) .

В настоящее время работы над небольшими магнитными холодильниками для космических применений, работающими по принципу адиабатического размагничивания, финансируются несколькими исследовательскими центрами НАСА. Исследования возможностей магнитных холодильников для коммерческих применений ведутся Astronautics Corporation of America (США, Висконсин) и Университетом Виктория (Канада). Изучением материалов для рабочих тел магнитных холодильников с прикладной точки зрения в настоящее время интенсивно занимаются Лаборатория Эймса (Ames, штат Айова), Университет Three Rivers в Квебеке (Канада), NIST (Gathersburg, MD) и компания "Перспективные магнитные технологии и консультации" (AMT&C).

В 1997 году Astronautics Corporation of America продемонстрировала относительно мощный (600 Ватт) магнитный холодильник, работающий вблизи комнатной температуры. Эффективность этого холодильника была уже сравнима с эффективностью обычных фреоновых холодильников. Используемый активный магнитный регенератор (в этом устройстве совмещены функции теплового регенератора и рабочего тела), этот холодильник работал в течение более чем 1500 часов, обеспечивая рабочий интервал температур в 10 К вблизи комнатной температуры, мощность 600 Ватт, эффективность около 35 % по отношению к циклу Карно при изменении магнитного поля величиной 5 Тесла. В описываемом устройстве применялся сверхпроводящий соленоид, а в качестве рабочего тела использовался редкоземельный металл гадолиний (*Gd*). Чистый гадолиний использовался в этом качестве не только Astronautics, но и НАСА, Navy и др. лабораториями, что обусловлено его магнитными свойствами, а именно -- подходящей температурой Кюри (около 20 °С) и довольно значительным магнетокалорическим эффектом.

Величина МКЭ, а следовательно и эффективность процесса охлаждения в магнитном холодильнике определяется свойствами магнитных рабочих тел. В 1997 году Лаборатория Эймса сообщила об открытии в соединениях  $Gd_5(SixGe_{1-x})_4$  гигантского магнетокалорического эффекта. Температура магнитного упорядочения этих материалов может варьироваться в широких пределах от 20 К до комнатной температуры благодаря изменению соотношения содержания кремния (*Si*) и германия (*Ge*). Наиболее перспективными для использования в качестве рабочих тел в настоящее время считаются металл гадолиний, ряд интерметаллических соединений на основе редкоземельных

элементов, система соединений силицидов-германидов  $Gd_5(Ge-Si)_4$ , а также  $La(Fe-Si)_{13}$ . Применение этих материалов позволяет расширить рабочий интервал температур холодильника и существенно улучшить его экономические показатели.

Заметим, однако, что пионерские работы по поиску эффективных сплавов для рабочих тел магнитных холодильников были выполнены на несколько лет раньше на физическом факультете Московского университета. Наиболее полные результаты этих исследований изложены в докторской диссертации ведущего научного сотрудника физического факультета МГУ А. М. Тишина 1994 года. В ходе этой работы были проанализированы многочисленные возможные комбинации редкоземельных и магнитных металлов и других материалов с точки зрения поиска оптимальных сплавов для реализации магнитного охлаждения в различных диапазонах температур. Было обнаружено, в частности, что среди материалов с высокими магнетокалорическими свойствами соединение  $Fe_{49}Rh_{51}$  (сплав железа с родием) обладает наибольшим удельным (т.е. приходящимся на единицу магнитного поля) магнетокалорическим эффектом. Величина удельного МКЭ для этого соединения в несколько раз больше, чем в соединениях силицидов-германидов. Этот сплав не может быть использован на практике из-за его большой стоимости, а также существенных гистерезисных эффектов в нём, однако, он может служить своеобразным эталоном, с которым следует сравнивать магнетокалорические свойства исследуемых материалов.

Наконец, в январе этого года журнал *Science News* (v. 161, п. 1, p.4, 2002) сообщил о создании в США первого в мире бытового (т.е. применимого не только в научных, но и в бытовых целях) холодильника. Работающая модель такого холодильника была изготовлена совместно *Astronautics Corporation of America* и *Ames Laboratory* и впервые продемонстрирована на конференции Большой Восьмерки в Детройте в мае 2002 года. Рабочий прототип предлагаемого бытового магнитного холодильника действует в области комнатных температур и использует в качестве источника поля постоянный магнит. Говоря об этом революционном достижении, профессор Карл Шнайднер из Лаборатории Эймса отметил: "Мы являемся свидетелями исторического события в развитии техники. В демонстрировавшихся ранее магнитных холодильных устройствах использовались большие сверхпроводящие магниты, но в этом новом магнитном холодильнике впервые применен постоянный магнит, не требующий охлаждения".

Устройство получило высокую оценку экспертов и министра энергетики США. Оценки показывают, что применение магнитных холодильников позволит уменьшить общее потребление энергии в США на 5 %. Планируется, что магнитное охлаждение сможет использоваться в самых различных областях человеческой деятельности — в частности, в ожижителях водорода, охлаждающих устройствах для высокоскоростных компьютеров и приборов на основе СКВИДов, кондиционерах для жилых и производственных помещений, охлаждающих системах для транспортных средств, в бытовых и промышленных

холодильниках и т.п. Необходимо отметить, что работы по магнитным холодильным устройствам финансируются министерством энергетики США уже в течение 20 лет.

## Конструкция холодильника

В созданном прототипе магнитного холодильника используется вращающаяся колёсная конструкция. Она состоит из колеса, содержащего сегменты с порошком гадолиния, а также мощного постоянного магнита.

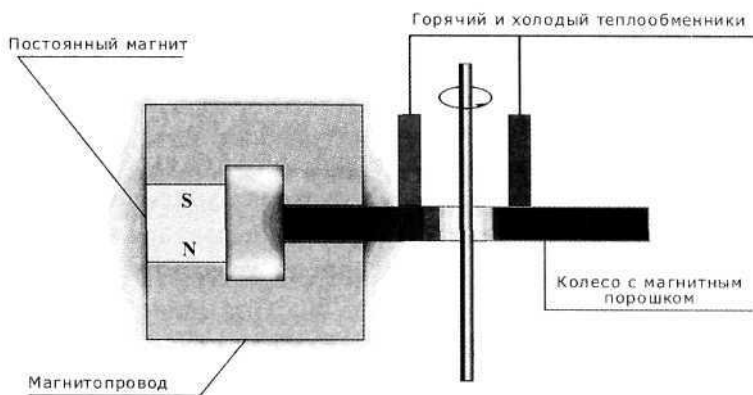


Схема работы магнитного холодильника

© AMT&C

Конструкция спроектирована таким образом, что колесо прокручивается через рабочий зазор магнита, в котором сконцентрировано магнитное поле. При вхождении сегмента с гадолинием в магнитное поле в гадолинии возникает магнетокалорический эффект - - он нагревается. Это тепло отводится теплообменником, охлаждаемым водой. Когда гадолиний выходит из зоны магнитного поля, возникает магнетокалорический эффект противоположного знака и материал дополнительно охлаждается, охлаждая теплообменник с циркулирующим в нем вторым потоком воды. Этот поток собственно и используется для охлаждения холодильной камеры магнитного холодильника. Такое устройство является компактным и работает фактически бесшумно и без вибраций, что выгодно отличает его от использующихся сегодня холодильников с парогазовым циклом.

"Постоянный магнит и рабочее тело в виде гадолиния не требуют подвода энергии, — говорит профессор Карл Шнайднер из Ames Laboratory. Энергия необходима для вращения колеса и обеспечения работы водяных насосов".

Впервые эта технология была апробирована еще в сентябре 2001 года. В настоящее время идет работа над дальнейшим расширением ее возможностей: совершенствуется технологический процесс коммерческого производства чистого гадолиния и необходимых его соединений, который позволит добиться

большей величины МКЭ при меньших затратах. Одновременно сотрудники Лаборатории Эймса сконструировали постоянный магнит, способный создавать сильное магнитное поле. Новый магнит создаёт поле в два раза большее, чем магнит в предшествующей конструкции магнитного холодильника (2001 г.), что является весьма важным, т.к. величина магнитного поля определяет такие параметры холодильника, как эффективность и выходная мощность. На процесс получения соединения для рабочего тела  $Gd_5(Si_2Ge_2)$  и конструкцию постоянного магнита поданы заявки на патент.

### **Преимущества, недостатки и области применения**

Все магнитные холодильники можно разделить на два класса по типу используемых магнитов: системы, использующие сверхпроводящие магниты и системы на постоянных магнитах. Первые из них обладают широким диапазоном рабочих температур и относительно высокой выходной мощностью. Они могут использоваться, например, в системах кондиционирования больших помещений и в оборудовании хранилищ пищевых продуктов. Охлаждающие системы на постоянных магнитах имеют относительно ограниченный температурный диапазон (не более, чем на 30 °С за один цикл) и, в принципе, могут применяться в устройствах со средней мощностью (до 100 Ватт) — таких как автомобильный холодильник и портативный рефрижератор для пикника. Но и те, и другие обладают целым рядом преимуществ над традиционными парогазовыми холодильными системами:

Низкая экологическая опасность: Рабочее тело — твердое и может быть легко изолировано от окружающей среды. Применяемые в качестве рабочих тел металлы лантаниды малотоксичны, и могут быть использованы повторно после утилизации устройства. Теплоотводящая среда должна обладать всего лишь низкой вязкостью и достаточной теплопроводностью, что хорошо соответствует свойствам воды, гелия или воздуха. Последние хорошо совместимы с окружающей средой.

Высокая эффективность. Магнитокалорическое нагревание и охлаждение - практически обратимые термодинамические процессы, в отличие от процесса сжатия пара в рабочем цикле парогазового холодильника. Теоретические расчеты и экспериментальные исследования показывают, что магнитные охлаждающие установки характеризуются более высокими к.п.д. и экономичностью. В частности, в области комнатных температур магнитные холодильники потенциально на 20-30 % эффективнее, чем работающие по парогазовому циклу. Технология магнитного охлаждения в перспективе может быть очень эффективной, что позволит значительно сократить стоимость таких установок.

Долгий срок эксплуатации. Технология предполагает использование малого числа движущихся деталей и низких рабочих частот в охлаждающих устройствах, что значительно сокращает их износ.

Гибкость технологии. Возможно использование различных конструкций магнитных холодильников в зависимости от назначения.

Полезные свойства заморозки. Магнитная технология позволяет производить охлаждение и заморозку различных веществ (вода, воздух, химикаты) с незначительными изменениями для каждого случая. В отличие от этого, эффективный парогазовый цикл охлаждения требует многих отдельных ступеней или смеси различных рабочих тел-охладителей для проведения такой же процедуры.

Быстрый прогресс в развитии сверхпроводимости и улучшении магнитных свойств постоянных магнитов. В настоящее время целый ряд известных коммерческих компаний успешно занимаются улучшением свойств магнитов *NdFeB* (наиболее эффективные постоянные магниты) и работают над их конструкциями. Наряду с известным прогрессом в области сверхпроводимости это позволяет надеяться на улучшение качества магнитных холодильников и одновременное их удешевление.

Недостатки магнитного охлаждения.

Необходимость экранировки магнитного источника.

Относительно высокая в настоящее время цена источников магнитного поля.

Ограниченный интервал изменения температуры в одном цикле охлаждения в системах на постоянных магнитах. (не более 30 °С).

**Будет ли Россия самостоятельно развивать сверхперспективную технологию?**

В нашей стране до настоящего времени проблема магнитного охлаждения существует только на уровне научных лабораторий, хотя именно российские ученые в начале 90-х годов выполнили первые работы по теории и практике применения МКЭ для создания магнитных холодильных машин. В соавторстве с сотрудниками компании "Перспективные магнитные технологии и консультации" и физического факультета МГУ уже многие годы работают создатели рабочего прототипа магнитного холодильника, о котором шла речь выше. К сожалению, в России такие разработки ведутся на недостаточном уровне из-за отсутствия необходимых средств. Не вызывает сомнения, что при соответствующей финансовой поддержке государственных или коммерческих структур разработка технологии и производство магнитных холодильников в России безусловно возможны. По нашему мнению необходимо в самое ближайшее время привлечь к работам в данном направлении все заинтересованные стороны.

Источник: [www.ndfeb.ru](http://www.ndfeb.ru)

## **6.7. Применение магнитов типа *Nd-Fe-B* в электровакуумном приборостроении**

Неослабевающий интерес разработчиков СВЧ-приборов к классу постоянных магнитов на основе интерметаллических соединений редкоземельных металлов (РЗМ) с переходными металлами с момента появления таких магни-

тов в 1968 г. обусловлен возможностями значительной минимизации массо-габаритных характеристик пакетированных изделий вакуумной электроники.

Разработка и производство ламп бегущей волны, магнетронов и клистронов (в том числе многолучевых) с магнитными фокусирующими системами (МФС) на основе РЗМ-магнитов для использования в бортовых и мобильных РЛС, на сегодняшний день — уже добрая традиция.

Последние годы в разных странах активно ведутся работы по замене электромагнитов и теплых соленоидов магнитными системами на постоянных магнитах для ламп обратной волны, гиротронов и гироклистронов.

Применяемые в магнитных фокусирующих системах постоянные РЗМ-магниты можно условно разделить на два класса: самарий-кобальтовые (*Sm-Co*) и класса неодим-железо-бор (*Nd-Fe-B*).

В свою очередь самарий-кобальтовые магниты представлены типами КС37 — на основе интерметаллида  $SmCo_5$ , и КС25 — на основе многофазной композиции  $(Sm,Zr)\{Co, Cu, Fe\}_z$ . При частичной замене части самария на тяжелые РЗМ, как правило, на гадолиний (*Gd*), эрбий (*Er*) или их сочетание, легко получить магниты с заранее заданными значениями обратимого температурного коэффициента магнитной индукции ( $\alpha$ ). В частности, были разработаны магниты типа КСЭГ с  $\alpha$  близкими к нулю и даже положительными в определенном температурном интервале, но с неизбежной, порой значительной, потерей значений основных гистерезисных характеристик.

Магниты неодим-железо-бор, применительно к данной теме, представим тремя типами (в соответствии с маркировкой ООО "НПК "Магниты и магнитные технологии", по МАЕР.680093.001 ТУ): МАЕР36ML — базовый состав для общетехнических применений, МАЕР30HLs — "термостойкий" состав для использования в широком интервале температур и МАЕР26HSs — "термостабильная" композиция с пониженным коэффициентом  $\alpha$ .

Сравнительные свойства представленных постоянных магнитов даны в табл.1 и на рис.6.7.1, а,б. При повышенных гистерезисных характеристиках магнитов *Nd-Fe-B* они проигрывают магнитам типа КС в термостойкости и термостабильности. Тем не менее, магниты на основе сплавов неодим-железо-бор все шире применяются даже в довольно "капризном" производстве ЭВП благодаря их доступности, экономичности и технологичности.

Иллюстрацией применения неодимовых магнитов для электровакуумного приборостроения могут служить разработанные магнитные фокусирующие системы следующих классов серийных приборов.

### **Пример 1. Магнитная система лампы обратной волны**

Разработанные в России и не имеющие зарубежных аналогов лампы обратной волны (ЛОВ) являются монохроматическими СВЧ-генераторами миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов и обладают уникальной возможностью перестройки рабочей частоты —  $\pm 30\%$  номинала.



## Свойства основных типов редкоземельных постоянных магнитов

| Тип/Марка | $B_r$ , Тл | $H_{cb}$ , кА/м | $H_{cj}$ , кА/м | $\alpha_b, \%/^{\circ}\text{C}$<br>при 20-<br>200 $^{\circ}\text{C}$ | $T_{max}, ^{\circ}\text{C}$ |
|-----------|------------|-----------------|-----------------|----------------------------------------------------------------------|-----------------------------|
| КС37      | 0,88/0,92  | 620/660         | >1400           | -0,050                                                               | 250                         |
| КС25      | 1,04/1,08  | 750/780         | >1600           | -0,030                                                               | 350                         |
| МАЕР36ML  | 1,24/1,28  | 920/1010        | >950            | -0,120                                                               | ПО                          |
| МАЕР30HLs | 1,10/1,14  | 860/900         | >2500           | -0,120                                                               | 220                         |
| МАЕР26HSs | 1,04/1,08  | 820/860         | >1500           | -0,060                                                               | 160                         |

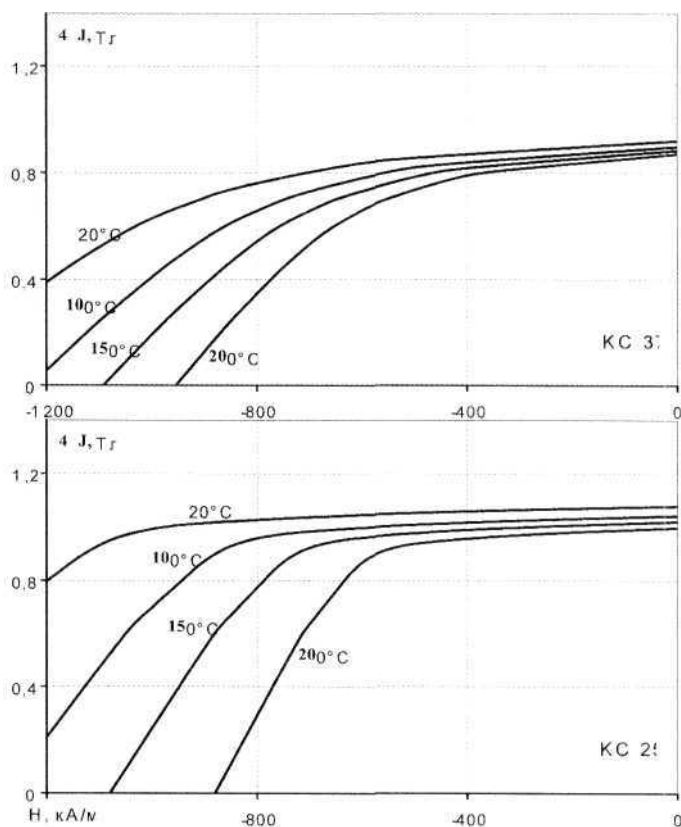


Рис. 6.7.1,а. Размагничивающие участки полных петель гистерезиса основных типов редкоземельных постоянных магнитов при разных температурах

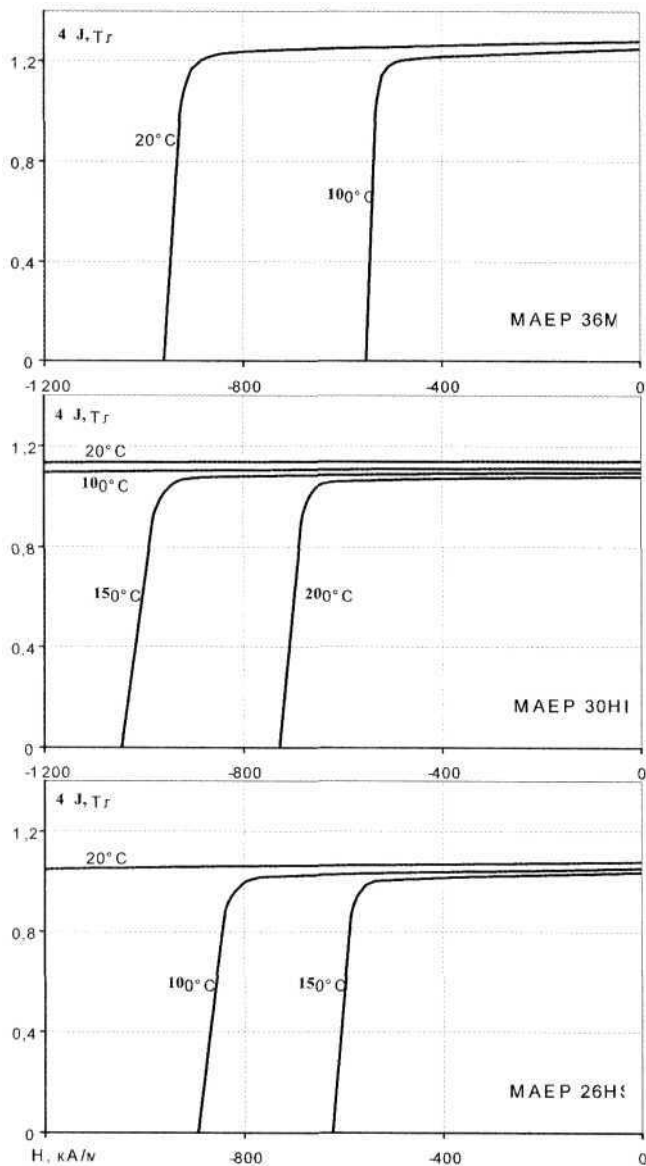


Рис. 6.7.1,6. Размагничивающие участки полных петель гистерезиса основных типов редкоземельных постоянных магнитов при разных температурах

Для реализации рабочих параметров ЛОВ должна располагаться в однородном магнитном поле определенной напряженности, что достигалось с помощью электромагнита. Однако, использование громоздкого электромагнита с источником питания снижает автономность, значительно повышает стоимость и тем самым сужает область применения ЛОВ.

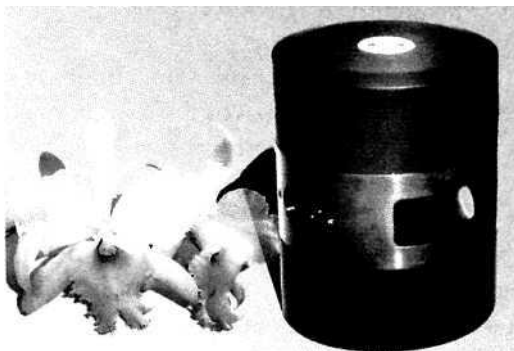


Рис.6.7.2. Магнитная система "Орхидея"

Разработка магнитной системы, способной заменить электромагнит, для комплектации ЛОВ, учитывая условия эксплуатации ( $0-40^{\circ}\text{C}$ ), проведена с использованием магнитов типа МАЕР36ML.

Полученная система МАЕР.684116.136 "Орхидея" обеспечивает стабильную воспроизводимость генерации ЛОВ различных частотных диапазонов вплоть до 1500 ГГц — рис. 6.7.2.

Данная магнитная система создает в цилиндрической рабочей области диаметром 45 мм и длиной 33,5 мм высокооднородное магнитное поле величиной не менее 1,2 Тл, при максимальной неоднородности в зоне расположения замедляющей системы ЛОВ — 2 %.

Параметры реальной магнитной системы представлены на рис.6.7.3.

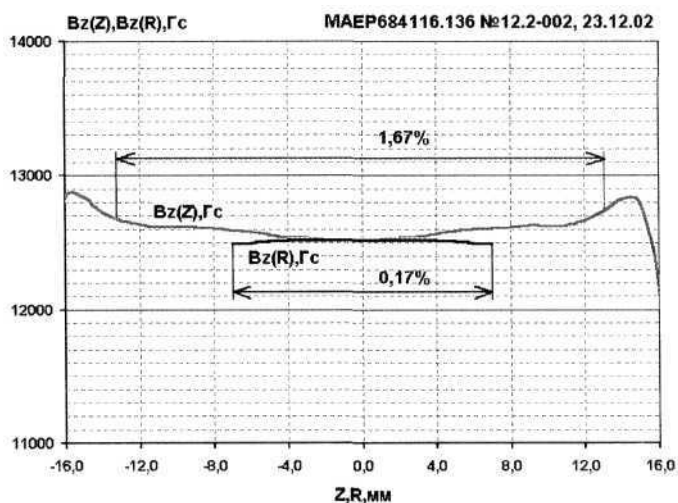


Рис.6.7.3. Параметры МС "Орхидея". Значения на графиках — неоднородности поля в продольном (Z) и радиальном (R) направлениях

На базе данной МС разработано целое семейство систем для ламп обратной волны и оротронов.

### **Пример 2. Магнитные системы лампы бегущей волны**

В настоящее время магниты типа МАЕР26HSs используются в производстве магнитных систем для ламп бегущей волны (ЛБВ).

Разработаны и поставляются МС двух типов: магнитные периодические фокусирующие системы (МПФС) и комбинированные МС с последовательными периодической и регулярной составляющими магнитного поля.

Поскольку принципы проектирования подобных систем практически ничем не отличаются от МС на основе магнитов типа КС не будем останавливаться на них подробно.

Однако, при принятии решения о применении магнитов типа *Nd-Fe-B* следует обратить особое внимание на температурные условия работы прибора.

В отдельных случаях, для обеспечения требований температурной стабильности распределения магнитного поля приходится применять конструкции МС с использованием термокомпенсационных элементов, что усложняет технологическую составляющую производства МПФС.

### **Пример 3. Магнитная система магнетрона**

Проблемы применения магнитов неодим-железо-бор для производства МС магнетронов те же, что и у ЛБВ. — Недостаточное охлаждение конструкции в процессе работы прибора неизбежно приведет к дрейфу частоты пропорционально величине обратимого температурного коэффициента магнитной индукции материала магнита.

Тем не менее, можно привести пример применения неодимовых магнитов в серийной МС.

Система МАЕР.684116.112 "Цикламен" с продольной составляющей магнитной индукции (в зависимости от количества подстроечных переключателей) в пределах 165-230 мТл обеспечивает работу импульсного магнетрона МИ 456 мощностью  $R_{вых} = 2,5$  Мвт,  $P_{ср} = 5$  квт, с частотой 2800 с 10 МГц и  $t = 6$  мкс в составе медицинского ускорителя.

### **Пример 4. Магнитные системы клистронов**

Наиболее широкое применение магниты типа МАЕР26HSs нашли в производстве фокусирующих систем с регулярными и реверсными магнитными полями для мощных широкополосных однолучевых и многолучевых клистронов — рис. 6.7.4.

На сегодняшний день в серийном производстве находится 17, а в разработке 4 наименования МФС и МРФС.

Необходимо отметить, что все клистроны, комплектуемые МС на магнитах *Nd-Fe-B* имеют интенсивное воздушное или жидкостное охлаждение.

Повышенные требования к значениям амплитуд, однородностей продольных и поперечных составляющих магнитных полей наиболее успешно реализуется при использовании магнитов типа МАЕР26HSs, в силу композиционных и технологических особенностей их производства.

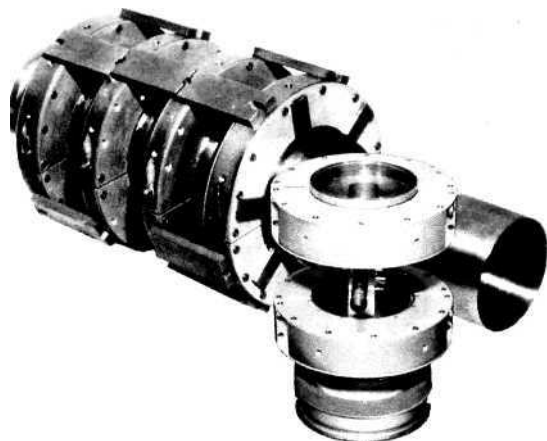


Рис. 6.7.4. Магнитные системы клистронов

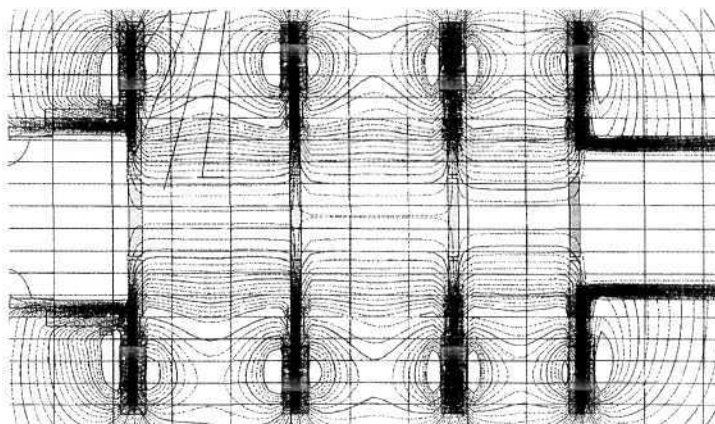


Рис.6.7.5. Картина распределения магнитного поля МРФС  
усилительного клистрона

Рекордные гистерезисные характеристики магнитов играют важную роль для снижения массы и габаритов пакетированных конструкций в изделиях мобильного базирования. А с учетом веса МС, порой достигающего до нескольких десятков килограмм, немаловажным обстоятельством при серийном выпуске изделий является цена.

В качестве примера на рис.6.7.5 представлена картина поля МРФС с двумя реверсами МАЕР.684116.125 "Тюльпан" многолучевого (29 пучков) импульсного усилительного клистрона с экранированным катодом.

За счет сужения зон реверса поля, однородности продольной составляющей в регулярных областях не хуже 4 % и значений поперечной составляющей по всей длине пучков не более 3 мТл -- рис.6.7.4 -- система обеспечивает высокое токопрохождение прибора.

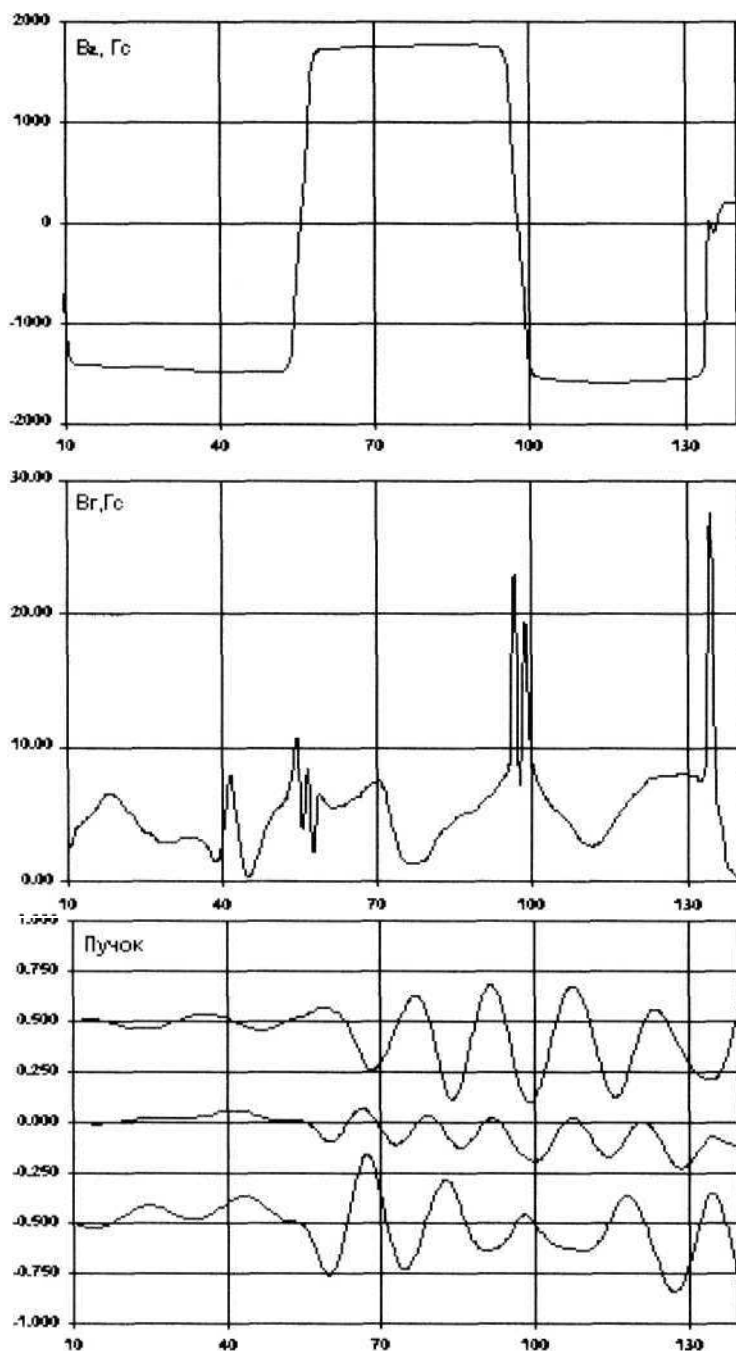


Рис.6.7.6. Распределение вдоль прибора продольной ( $B_z$ ) и поперечной ( $Br$ ) составляющих магнитного поля и пульсации оси и периферии пучка электронов относительно центра одного из пролетных каналов радиуса  $R = 1$

Таким образом, проведенная за последние 10 лет работа показывает перспективность применения магнитов типа  $Nd-Fe-B$  в разработке и производстве магнитных элементов и систем для обеспечения задач электровакуумного приборостроения.

Источник

[www.magn-tech.ru](http://www.magn-tech.ru)

## **6.8. Процессы перемагничивания и методы записи информации на магнитных пленках**

### **6.8.1. Процессы перемагничивания тонких ферромагнитных пленок**

Под перемагничиванием будем понимать процесс, при котором ферромагнитный образец, намагниченный до насыщения в одном направлении, под воздействием внешнего магнитного поля намагничивается в противоположном направлении. Для получения полной картины явлений, наблюдаемых при перемагничивании ферромагнитной пленки, проанализируем основные этапы этого процесса. Удобно начать знакомство с изменений, происходящих в пленке под влиянием магнитного поля, если она вначале находится в размагниченном состоянии. В этом случае пленка оказывается разбитой на отдельные области (домены), намагниченные до насыщения. Магнитные моменты доменов распределены так, что результирующий магнитный момент образца равен нулю. Такому состоянию соответствует минимум суммарной энергии пленки. При воздействии на пленку внешнего магнитного поля происходит перераспределение магнитных моментов доменов, вследствие чего тонкопленочный образец приобретает магнитный момент, величина которого возрастает с увеличением магнитного поля. Происходит намагничивание пленки. Рассмотрим этот процесс подробнее.

Для конкретности допустим, что тонкая магнитная пленка обладает одноосной анизотропией с осью легкого намагничивания (ОЛН), лежащей в ее плоскости. Доменная структура такой пленки в размагниченном состоянии показана на рис. 6.8.1, а. Домены имеют вид широких полос, разделенных междоменными границами. На рис. 6.8.1, г, где показана зависимость намагниченности от величины напряженности поля  $H$ , этому состоянию пленки соответствует точка 0. Векторы намагниченности в соседних доменах имеют противоположные направления и ориентированы вдоль ОЛН. Намагниченностью называется магнитный момент единицы объема ферромагнетика. Напомним, что при ориентации векторов намагниченности вдоль ОЛН энергия одноосной анизотропии минимальна. Приложим к пленке вдоль ОЛН плавно возрастающее магнитное поле. В доменах, у которых векторы намагниченности ориентированы противоположно напряженности внешнего поля, плотность энергии окажется больше, чем в доменах с намагниченностью, направленной

по полю, на величину . Следовательно, эти домены станут энергетически невыгодными. Пленка может перейти в состояние с меньшей энергией, если домены с намагниченностью, направленной по направлению поля, начнут увеличиваться за счет невыгодно ориентированных доменов. Поэтому, когда магнитное поле достигает определенной величины, происходит движение доменных границ (ДГ), которое приводит к сужению "невыгодных" доменов и увеличению объема соседних (рис. 6.8.1, б). Пленка в целом оказывается намагниченной. У такого образца результирующая намагниченность совпадает с направлением вектора напряженности магнитного поля и равна разности

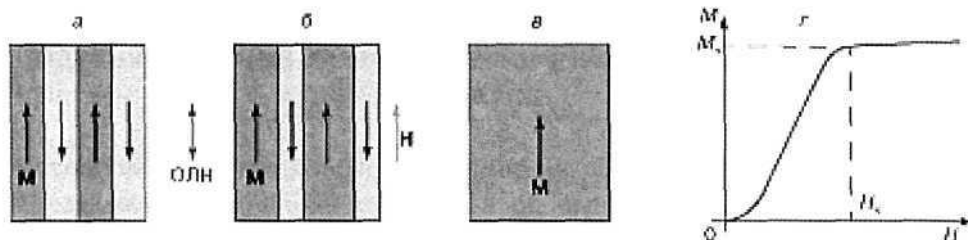


Рис. 6.8.1. а-в — схема процесса намагничивания ферромагнитной пленки в магнитном поле, приложенном вдоль оси легкого намагничивания. Стрелками обозначено направление намагниченности в доменах; г — зависимость намагниченности пленки от напряженности поля  $H$

магнитных моментов антипараллельных доменов, деленной на объем всей пленки.

На первом этапе намагничивания пленки, когда магнитное поле слабое, наблюдаются относительно небольшие смещения отдельных ДГ. В более сильных полях величина их смещения резко возрастает и размеры выгодно ориентированных доменов начинают быстро увеличиваться за счет соседних областей (рис. 6.8.1, б ). В относительно узком интервале полей происходит значительный рост намагниченности пленки. Наблюдается линейный ход зависимости  $M$  от  $H$  (рис. 6.8.1, г). В магнитном поле еще большей величины оставшиеся невыгодно ориентированные домены продолжают уменьшаться в размерах и постепенно исчезают. Происходит так называемое техническое насыщение ферромагнетика (рис. 6.8.1, в). Завершающая стадия намагничивания пленки дает относительно небольшой прирост  $M$ . Наблюдается нелинейный ход зависимости  $M$  от  $H$  (рис. 6.8.1, г). Кривая, характеризующая зависимость намагниченности от величины  $H$ , называется начальной кривой намагничивания. Поле, соответствующее техническому насыщению образца, называется полем насыщения  $H_s$ , а намагниченность — намагниченностью насыщения  $M_s$  (рис. 6.8.1, г). Форма кривой намагничивания в большой степени зависит от характера протекания процессов изменения доменной структуры в магнитном поле. В тонких магнитных пленках намагничивание часто происходит в результате нескольких больших скачков доменных границ. В этом случае линей-



ная часть кривой намагничивания имеет небольшой наклон и наблюдается узкий интервал нелинейного хода кривой  $M(H)$ . В пленках толщиной более 100 нм под действием магнитного поля сначала происходит исчезновение невыгодно ориентированных доменов, расположенных в центральной части образцов. На краях остаются клиновидные домены с намагниченностью, направленной против направления магнитного поля.

Завершающий этап намагничивания происходит в результате медленного "подавления" клиновидных доменов в более сильных полях. Соответственно уменьшается крутизна кривой намагничивания и расширяется интервал нелинейного хода кривой  $M(H)$ . В полях выше технического насыщения идет последний этап намагничивания, который называется парапроцессом. Возрастание  $M$  происходит за счет поворота к направлению поля спиновых магнитных моментов отдельных электронов, находящихся внутри намагниченных доменов технического насыщения областей [Белов К.П., 1957].

Ознакомившись с особенностями намагничивания пленок, рассмотрим процессы их перемагничивания. Пусть имеется тонкая пленка, намагниченная до насыщения в магнитном поле, направленном вдоль ОЛН (рис. 6.8.2, а). Примем это направление магнитного поля за положительное. Будем постепенно уменьшать поле до нуля. В этот период пленка будет оставаться однодоменной и ее намагниченность заметно не изменится (рис. 6.8.2, е). Намагниченность пленки при  $H=0$  называется остаточной намагниченностью ( $M_r$ ). Обозначим точку на рис. 6.8.2, е, соответствующую данному состоянию пленки, цифрой 1. Чтобы перемагнитить пленку, необходимо приложить к ней внешнее магнитное поле (отрицательное), направленное противоположно полю, в котором намагничивалась пленка. Поскольку в этом состоянии в пленке нет доменных границ, то ее перемагничивание может происходить только за счет процессов вращения векторов намагниченности. Обычно эти процессы начинаются на краю пленки, так как этому способствуют размагничивающие поля, имеющие наибольшее значение вблизи краев тонкопленочного образца.

Образование размагничивающего поля связано с тем, что пленка в намагниченном состоянии представляет собой постоянный магнит, на полюсах которого сосредоточены поверхностные магнитные заряды (рис. 6.8.2, а). В действительности никаких магнитных зарядов не существует. Однако использование понятия "магнитный заряд" в некоторых случаях бывает удобным для объяснения отдельных свойств ферромагнетиков. Наличие поверхностных магнитных зарядов на границе образца обуславливает существование собственного магнитостатического поля пленки, направленного противоположно вектору намагниченности (рис. 6.8.2, а). Если поле достаточно сильное, то под его действием векторы будут отклоняться от своего первоначального направления, заданного внешним положительным полем.

Отрицательное поле будет стремиться повернуть векторы намагниченности в сторону своего направления. Однако поворот векторов будет затруднен, так как он приводит к увеличению энергии анизотропии пленки. Поэтому в первый момент возрастания отрицательного поля, пока оно является слабым,

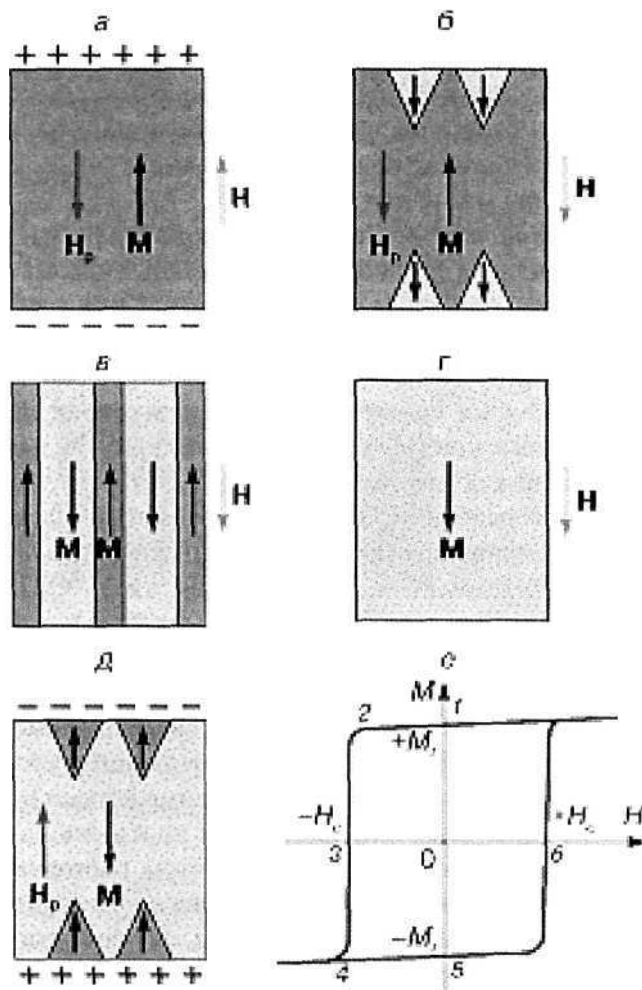


Рис. 6.8.2. Изменение доменной структуры и намагниченности в процессе перемagnetизации пленки

пленка остается однодоменной и ее намагниченность практически не изменяется. Затем, когда магнитное поле станет достаточно сильным, на краю пленки произойдет поворот векторов намагниченности. В итоге образуются небольшие домены клиновидной формы (зародыши обратной намагниченности). Поле, в котором происходит образование зародышей, называется полем зарождения доменов. Образовавшиеся домены выгодно ориентированы по отношению к направлению отрицательного поля (рис. 6.8.2, б). С возрастанием магнитного поля они увеличивают свои размеры.

На рис. 6.8.3 показан процесс образования и роста зародыша, выявленный порошковым методом в железоникелевой пленке толщиной 60 нм. Пленка предварительно намагничивалась в сильном магнитном поле, направленном вдоль ОЛН пленки. Направление этого поля принято за положительное. После приложения к пленке отрицательного поля происходит разворот векторов

намагниченности у края пленки, который выражается в появлении черных линий, направленных под углом к ОЛН пленки. Затем в магнитном поле определенной величины, в тех участках пленки, где разворот наибольший, возникают зародыши обратной намагниченности. На рис. 6.8.3, а виден зародыш, возникший в отрицательном магнитном поле величиной 430 А/м. С увеличением поля он растет, превращаясь в клинообразный домен (рис. 6.8.3, б ).

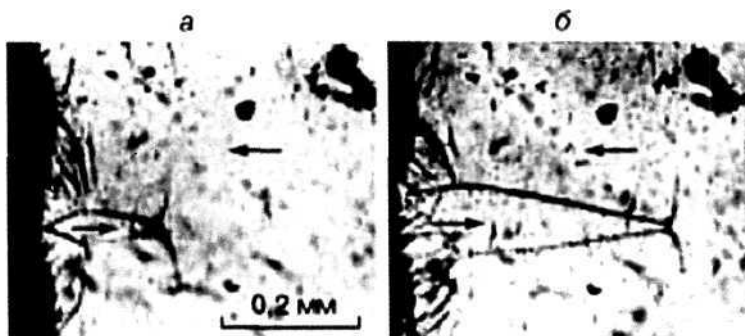


Рис. 6.8.3. Образование и рост зародыша в железоникелевой пленке толщиной 60 нм. Внешнее магнитное поле направлено горизонтально.  $H = 430$  А/м (а), 520 А/м (б )

Увеличение размеров домена происходит в основном за счет смещения его границ. Если поле по величине близко к полю, в котором происходит интенсивное движение доменных границ, процесс перемагничивания пленки протекает в виде одного или нескольких скачкообразных смещений доменных границ в узком интервале магнитных полей. Намагниченность пленки резко уменьшается до нуля (рис. 6.8.2, е, точка 3 ). Это происходит в результате быстрого роста зародышей намагниченности, которые сливаются и прорастают в крупные домены. Когда объем доменов с намагниченностью, направленной вдоль отрицательного поля, становится равным объему антипараллельных доменов, магнитный момент пленки уменьшается до нуля (рис. 6.8.2, е, точка 3). Физическая величина, равная напряженности отрицательного поля, в котором пленки переходят в размагниченное состояние, называется коэрцитивной силой ( $H_c$ ). Затем даже при небольшом увеличении отрицательного поля продолжается бурный рост выгодно ориентированных доменов за счет соседних (рис. 6.8.2, в, г) и вся пленка намагничивается в отрицательном направлении (рис. 6.8.2, е, точка 4). С уменьшением отрицательного поля до нуля (рис. 6.8.2, е, точка 5 ) намагниченность пленки становится равной остаточной намагниченности ( $-Mr$ ), для устранения которой снова необходимо приложить магнитное поле, равное коэрцитивной силе, но только направленное вдоль положительного направления. Рост магнитного поля сначала приводит пленку в размагниченное состояние (рис. 6.8.2, е, точка 6 ), а затем намагничивает ее в прежнем положительном направлении. Пленка возвращается в исходное со-

стояние. В итоге получается замкнутая кривая, которая называется петлей гистерезиса. Так как в рассматриваемом случае, а процесс интенсивного перемагничивания протекает в узком интервале полей, петля гистерезиса имеет форму, близкую к прямоугольной (рис. 6.8.2, е). Из рис. 6.8.2, е следует, что намагничивание и размагничивание пленки происходят по разным кривым. Изменение намагниченности отстает от изменения напряженности внешнего магнитного поля. Это явление называется магнитным гистерезисом.

Как видно из рис. 6.8.2, е, с возрастанием  $H_c$  (петля становится шире) должно увеличиваться значение напряженности отрицательного магнитного поля, чтобы перевести образец в размагниченное состояние. То есть образец становится более устойчивым к действию внешних магнитных полей. Это учитывается в технике. Например, при изготовлении постоянных магнитов, применяемых в различных устройствах, используются материалы с большой величиной  $H_c$ .

Рассмотренный ход кривой  $M(H)$  характерен для пленок толщиной менее 100 нм. В пленке большей толщины за счет достаточно сильных размагничивающих полей, существующих на краях, домены обратной намагниченности возникают еще в положительном поле в процессе его уменьшения. По мере уменьшения поля домены увеличиваются в размерах и намагниченность пленки заметно уменьшается. При  $H=0$  остаточная намагниченность  $M_r < M_s$ . При изменении направления поля на отрицательное будут продолжаться рост доменов и плавное уменьшение намагниченности. Таким образом, в отличие от тонких пленок уменьшение намагниченности происходит в относительно широком интервале магнитных полей и за счет плавного смещения доменных границ. В отрицательном поле определенной величины смещение ДГ более интенсивное и пленка переходит в размагниченное состояние. С увеличением поля начинается процесс намагничивания пленки в отрицательном направлении. Как указывалось выше, на завершающей стадии намагничивания на краях пленки остаются невыгодно ориентированные домены клиновидной формы. Намагниченность в этих доменах направлена против результирующего магнитного момента намагниченной части пленки, то есть вдоль размагничивающего поля (рис. 6.8.2, д). Поэтому краевые домены оказываются более устойчивыми к действию внешнего поля.

Переход пленки в насыщенное состояние происходит из-за постепенного исчезновения оставшихся доменов в нарастающем магнитном поле. Изложенные особенности перемагничивания пленок приводят к тому, что возрастает наклон боковых сторон петли гистерезиса и прямоугольность петли уменьшается. Петля гистерезиса приобретает форму, характерную для массивных (объемных) ферромагнетиков. Следует заметить, что перемагничивание пленок не всегда протекает по описанной схеме. Характер протекания процессов перемагничивания в большой степени зависит от свойств магнитного материала, из которого изготовлены тонкопленочные образцы.

Получив представление о процессах перемагничивания тонких пленок, можно перейти к рассмотрению механизмов записи и считывания информации на этих образцах.

### **6.8.2. Магнитная запись информации**

Для осуществления записи информации применяются магнитные носители. Магнитный носитель состоит из основы, изготовленной из немагнитного материала, на которую наносится магнитный слой. Этот слой служит для накопления и сохранения информации и называется рабочим слоем. В качестве носителя магнитной записи используют магнитные ленты, жесткие и гибкие магнитные диски. Материал основы магнитных носителей должен обладать вполне определенными физико-механическими свойствами. Так, у магнитной ленты основа должна иметь высокую прочность на растяжение, хорошую износостойкость, гладкую поверхность, равномерную толщину, быть эластичной. Основным материалом для изготовления основы лент и гибких дисков является полиэтилентерефталат (лавсан) [Котов Е.П., Руденко М.И.,1990]. Материалом основы жестких дисков является алюминиевый сплав. Он должен быть пригоден для полировки, обладать высокой твердостью и износостойкостью, в нем не должны образовываться микротрещины в процессе его обработки [Котов Е.П., Руденко М.И.,1990]. В качестве запоминающей (регистрирующей) среды в магнитных носителях используются ферролаковые рабочие слои. Ферролаковый слой готовят путем введения в состав лака магнитного порошка, который представляет собой систему, состоящую из микрочастиц размером менее микрона. Частицы должны быть максимально однородными. Магнитные поля, в которых перемагничиваются частицы, должны иметь близкие значения. Поверхность частиц должна быть идеально гладкой. Наличие на поверхности частиц различных неровностей, дефектов приводит к снижению их магнитной однородности [Василевский Ю.А.,1989].

В магнитных носителях применяют магнитные порошки с частицами, которые представляют собой в основном однодоменные образования. Коэрцитивная сила порошка должна быть достаточно большой. Кроме того, магнитные порошки должны обладать высокими значениями намагниченности насыщения. Частицы порошка могут иметь разную форму: игольчатую, сферическую и пластинчатую. В настоящее время предпочтение отдают порошкам, имеющим частицы игольчатой формы [Василевский Ю.А.,1989].

В носителях магнитной записи применяют следующие основные разновидности магнитных порошков: порошки гамма-оксида железа; гамма-оксида железа, модифицированного кобальтом, диоксида хрома  $CrO_2$  и металлические магнитные порошки железа и его сплавов [Василевский Ю.А.,1989].

При изготовлении магнитной ленты на гибкую движущуюся основу наносится тонкий слой магнитного лака. После сушки широкая основа подвергается резке на ленты стандартной ширины.

Роль магнитной среды для записи информации могут также выполнять сплошные металлические слои — пленки, которые наносятся на немагнитную полимерную основу термическим испарением сплавов металла в вакууме. Порошковые рабочие слои имеют толщину от 1 до 10-20 мкм. Толщина металлических слоев порядка 0,1 мкм [Василевский Ю.А., 1989].

При изготовлении гибких дисков, как и в магнитных лентах, в качестве рабочего слоя используют магнитные порошки, введенные в немагнитное связывающее вещество, а также сплошные металлические слои. В порошковом слое активный материал — порошок занимает 35-40% объема рабочего слоя, остальное приходится на связывающую немагнитную среду. В сплошном металлическом слое эта немагнитная среда отсутствует. Поэтому намагниченность насыщения такого слоя существенно выше, чем у порошкового, и он может быть значительно тоньше, чем у лент с ферролаковым слоем при одинаковом значении сигнала воспроизведения. В итоге лента с металлическим слоем обладает большей информационной емкостью на единицу объема.

### 6.8.3. Принцип магнитной записи

Система магнитной записи состоит из носителя записи и взаимодействующих с ним магнитных головок. На рис. 6.8.4 показаны носитель и головка записи кольцевого типа. Головка состоит из сердечника с обмоткой. В сердечнике имеется зазор шириной 0,1-10 мкм. При включении в обмотку тока записи (входной сигнал) в области зазора возникает магнитное поле рассеяния (поле записи), которое воздействует на прилегающую к головке область рабочего слоя движущегося магнитного носителя, например магнитной ленты [Василевский Ю.А., 1989].

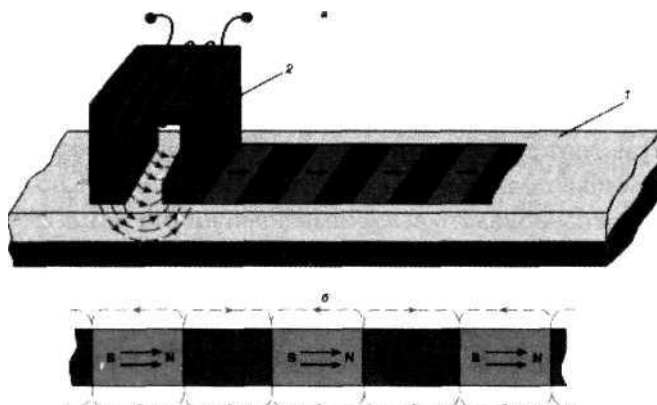


Рис. 6.8.4. Процесс магнитной записи: 1 — носитель записи, 2 — головка записи. Внизу показана последовательность участков с противоположным направлением намагниченности

В цифровой магнитной записи, используемой в компьютерной технике, в магнитную головку поступает ток, при котором поле записи через определенные промежутки времени изменяет свое направление на противоположное. В результате под действием поля рассеяния магнитной головки происходят намагничивание и перемагничивание отдельных участков движущегося магнитного носителя. При периодическом изменении направления поля записи в рабочем слое носителя возникает цепочка чередующихся участков с противоположным направлением намагниченности, которые соприкасаются друг с другом одноименными полюсами (рис. 6.8.4). В итоге сигнал, поступающий в головку записи, оставляет на движущемся носителе след, то есть магнитную запись. Рассмотренный вид записи, когда участки рабочего слоя носителя перемагничиваются вдоль его движения, называется продольной записью. Носители магнитной записи с продольным намагничиванием -- магнитные ленты, жесткие и гибкие магнитные диски -- составляют основную массу используемых в мире накопителей информации. Они играют важнейшую роль в современной науке, технике и промышленности, являясь одним из функциональных элементов вычислительной техники [Котов Е.П., Руденко М.И., 1990].

Чередующиеся участки, возникшие в металлизированном рабочем слое (пленке), являются доменами. Чем меньше размер домена, тем выше плотность записи информации. Однако с уменьшением размера доменов возрастает величина их размагничивающих полей, направленных в сторону, противоположную намагниченности в доменах. Эти поля способствуют их перемагничиванию. В результате смещение доменных границ одиночных доменов происходит в полях, меньших по величине коэрцитивной силы  $H_c$ . С уменьшением длины домена разница между  $H_c$  увеличивается. Понижается устойчивость домена к внешним полям. Из сказанного следует, что домен можно уменьшать до некоторого минимального размера. При меньших размерах доменов размагничивающие поля становятся настолько значительными, что домен перемагничивается и исчезает. Происходит стирание информации. Минимальные размеры домена, то есть размеры, при которых он еще устойчив при отсутствии внешнего магнитного поля, зависят от параметров пленки, в частности большую роль играет коэрцитивная сила пленки. Увеличение  $H_c$  снижает влияние эффекта саморазмагничивания и повышает устойчивость домена к действию внешних магнитных полей. Поэтому с возрастанием величины  $H_c$  минимальные размеры доменов становятся меньше.

Размер стабильного домена также зависит от толщины пленок  $d$ . С понижением  $d$  ослабевают размагничивающие поля доменов и происходит уменьшение их минимальных размеров при прежних значениях  $H_c$ . Поскольку в металлических пленках отсутствует немагнитная связывающая среда, то, как было отмечено выше, металлизированный рабочий слой носителя может иметь меньшую толщину, чем ферролаковый. Поэтому в пленках можно реализовать перемагниченные участки меньшего размера, а следовательно, обеспечить большую информационную плотность записи. Из сказанного следует, что

магнитные пленки являются перспективным материалом и обладают достоинствами, ценными при их использовании в технике магнитной записи.

Как мы уже отметили, после записи информации на магнитном носителе остаются участки, обладающие разным магнитным состоянием. При двоичном кодировании принято обозначать одно состояние цифрой 0, а другое — цифрой 1. Цифры 0 и 1 и соответствующие им участки носителя называются битами. Определенная последовательность из фиксированного количества нулей и единиц соответствует тому или иному символу, например: букве алфавита, цифре, знаку препинания и т.д. Таким образом, создавая в рабочем слое носителя нужную очередность намагниченных и перемагниченных участков, можно осуществить запись информации.

#### **6.8.4. Воспроизведение информации**

Для воспроизведения записанной информации применяются магнитные головки, которые называются воспроизводящими. Их устройство такое же, как и головок записи. В накопителях на магнитных дисках в основном используются универсальные головки, то есть устройства, с помощью которых осуществляются как запись, так и воспроизведение информации. Считывание информации происходит при движении магнитного носителя относительно головки воспроизведения. В этих условиях часть магнитного потока от участков носителя замыкается через сердечник магнитной головки. Во время движения носителя перед зазором головки проходят участки с противоположной ориентацией намагниченности. Поэтому магнитный поток в сердечнике периодически изменяется и в обмотке головки наводится ЭДС (выходной сигнал). Таким образом, статическое распределение намагниченности в магнитном слое носителя преобразуется в электрический сигнал.

#### **6.8.5. Магнитные диски**

В технике магнитной записи используются два вида магнитных дисков: жесткие и гибкие. Жесткий магнитный диск представляет собой круглую подложку толщиной около 1,5 мм, на обе стороны которой нанесен магнитный рабочий слой. Толщина ферролаковых рабочих слоев 1-3 мкм, сплошных металлических слоев -- до 1 мкм. Информация на дисках записывается на дорожках, представляющих замкнутые concentрические окружности.

Накопители на магнитных дисках относятся к запоминающим устройствам с произвольной выборкой информации. Это значит, что для отыскивания и выборки заданной информации не требуется последовательно считывать всю предшествующую информацию, как это надо делать на магнитных лентах [Василевский Ю.А., 1989]. В результате существенно уменьшается время доступа к содержащейся на дисках информации. Особенно широкое применение в компьютерной технике получили гибкие магнитные диски (ГМД). Они ис-



пользуются для записи программ, обработки результатов, расчетов и различных измерений. Уже первое применение ГМД выявило их достоинства: простоту смены дисков, малые габариты, удобство обращения, хранения и транспортирования. Продольная плотность записи информации на современных гибких дисках с рабочим слоем, содержащим ферропорошок, около 400 бит/мм. В перспективе плотность записи на ГМД может быть доведена до 2000 бит/мм [Котов Е.П., Руденко М.И.,1990].

Если в 70-е годы в технике магнитной записи монополюсное положение занимали носители магнитной записи с ферролаковым рабочим слоем, то сейчас создаются и осваиваются в промышленном производстве также магнитоносители с металлизированным рабочим слоем. Применение металлизированных дисков, работающих в паре с интегральными магнитными головками, позволило получить продольную плотность записи, равную 780 бит/мм. Идеальным материалом рабочего слоя для металлизированного диска представляется сплошная (беспористая) пленка ферромагнитного материала толщиной несколько десятков нанометров [Котов Е.П., Руденко М.И.,1990].

Использование магнитных дисков с металлизированным рабочим слоем в перспективе позволит многократно повысить информационную емкость дисковых магнитоносителей. Особенно повышается роль металлизированных слоев при использовании носителей с перпендикулярной записью информации, позволяющей существенно повысить плотность записи.

### 6.8.7. Термомагнитный метод записи информации

Этот метод записи применяется на пленках, обладающих перпендикулярной анизотропией, то есть на образцах, у которых ось легкого намагничивания направлена перпендикулярно их поверхности (рис. 6.8.5). Он основан на использовании зависимости некоторых параметров пленки от ее температуры. Пленка предварительно намагничивается до насыщения по нормали к ее плоскости (исходное состояние). Затем к ней прикладывается магнитное поле противоположного направления (рис. 6.8.5). Запись информации осуществляется

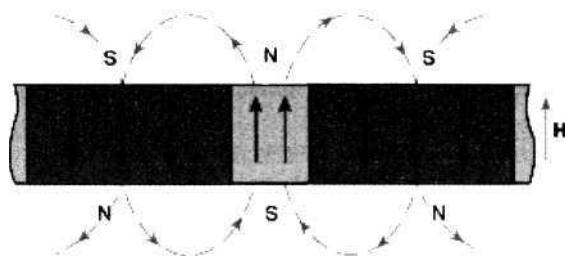


Рис. 6.8.5. Перпендикулярная запись информации на образцах с осью легкого намагничивания, направленной перпендикулярно их поверхности. В средней части рабочего слоя носителя находится перемагниченный участок

ется путем нагрева отдельных участков пленки, которая находится в магнитном поле. Нагревание производится кратковременным воздействием лазерного луча. Поле подбирается с таким расчетом, чтобы при отсутствии нагрева пленки его величина была недостаточной для перемагничивания пленки. При достаточно высокой температуре участка пленки происходит существенное изменение его магнитного состояния, например может в 3-4 раза уменьшаться коэрцитивная сила. Это приводит к тому, что нагретые участки пленки будут перемагничиваться. Ненагретые области обладают более высокой коэрцитивной силой и не изменяют своего состояния. То есть при одновременном воздействии лазерного излучения и магнитного поля в рабочем слое носителя формируются области с намагниченностью, ориентированной противоположно направлению пленки в исходном состоянии. Эти области и представляют собой записанную информацию (рис. 6.8.5).

Минимальные размеры области, соответствующей одному биту информации, определяются диаметром сфокусированного светового луча [Бенедичук И.В., Введенский Б.С., 1987]. Векторы намагниченности в перемагниченных участках направлены по нормали к плоскости пленки. Следовательно, разноименные полюсы перемагниченных участков расположены на противоположных сторонах рабочего слоя носителя. Поэтому магнитные поля от соседних неперемагниченных участков будут стабилизировать состояние перемагниченного участка. Это позволяет заметно уменьшить минимальные размеры стабильных доменов. В результате перпендикулярная запись обеспечивает в несколько раз более высокую плотность записи по сравнению с продольной. Следует отметить, что пленки с перпендикулярной анизотропией используются и в магнитной записи. Считывание информации осуществляется магнитооптическим методом или индукционным с помощью магнитных головок. При использовании магнитооптического метода считывания лазерный луч направляется на поверхность пленки. После отражения луч регистрируется фотоприемником. Благодаря специальному устройству, применяемому в данном случае, интенсивность отраженного луча, который попадает в фотоприемник, зависит от направления намагниченности в участках пленки. Это позволяет определить намагниченные и перемагниченные области магнитного носителя. В качестве рабочего слоя у магнитооптических носителей могут использоваться аморфные пленки, полученные из сплавов редкоземельных элементов (тербий, гадолиний, диспрозий) с переходными металлами (железо, кобальт).

## **Заключение**

В последнее время вычислительная техника необычайно широко внедряется в различные сферы жизни общества. Достаточно сказать, что электронно-вычислительные машины используются при автоматизации различных производственных процессов, решении социально-экономических задач, в науке, образовании, медицине и т.д. Разнообразное применение вычислительной техники стимулирует ее быстрое развитие и дальнейшее совершенствование запоминающих устройств (ЗУ), на которых осуществляются запись и хранение

информации. Улучшение качества ЗУ непосредственно связано с повышением плотности записи информации, увеличением их информационной емкости.

Большую роль в решении этой задачи играет применение в ЗУ тонких магнитных пленок. В статье описаны особенности поведения доменной структуры пленок в магнитном поле, которые позволяют лучше представить процесс записи информации в ЗУ на магнитных лентах и дисках.

При объяснении процессов перемагничивания тонких магнитных пленок, принципа записи и считывания информации использовались физические термины, понятные не всем читателям. Поэтому автор рекомендует сначала ознакомиться с содержанием статьи [Казаков В.Г., 1997], посвященной описанию структуры и магнитных свойств тонкопленочных магнитных образцов.

## Литература

*Казаков В.Г.* Тонкие магнитные пленки // Соросовский Образовательный Журнал. 1997. N 1. С. 107-114.

*Белов К.П.* Упругие, тепловые и электрические явления в ферромагнетиках. М.: Изд-во ТТЛ, 1957. 279 с.

*Котов Е.П., Руденко М.И.* Носители магнитной записи. М.: Радио и связь, 1990. 384 с.

*Василевский Ю.А.* Носители магнитной записи. М.: Искусство, 1989. 287 с.

*Бенедичук И.В., Введенский Б.С.* // Техника кино и телевидения. 1987. N 1. С. 61-68.

## 6.9. Применение магнита на транспорте



На снимке: проект высокоскоростного монорельса, созданный советским авиаконструктором Р.Л. Бартини, 60-е годы

...Почему отечественный монорельс можно назвать "неизвестным"? Когда говорят о монорельсовом транспорте, обычно приводят в качестве примера зарубежные конструкции в Германии, Франции, Англии, США, Японии...

Об истории же отечественного монорельса — не промышленного транспорта, а предназначенного для перевозки людей и грузов, к сожалению, мало

кто слышал не только за рубежом, но и в нашей стране. И это — при том, что решения отечественных монорельсов на протяжении почти двухвековой его истории были на уровне зарубежных, а иногда идеи на десятилетия опережали свое время.

Эта страница - - попытка хотя бы в общих чертах поведать читателям "историю забытых побед" этого перспективного, но до сих пор не нашедшего своего места в экономике нашей страны вида транспорта.

### **ВПЕРЕДИ ПАРОВОЗА**

Действительно, первый монорельс был создан в России на целых 15 лет раньше первого паровоза. В 1820 году в подмосковном селе Мячкове, Иван Эльманов построил "дорогу на столбах": по верхнему продольному брусу катились вагонетки, которые тянули лошади.

Вскоре, 22 ноября 1821 года, монорельсовый путь был запатентован в Англии Пальмером - - он додумался до той же идеи самостоятельно и о Мячкове никогда не слышал. Пальмер построил свой монорельс в 1825 году, и именно с этого года за рубежом отсчитывают историю монорельсового транспорта, т.к о дороге Эльманова в Европе практически было неизвестно.

После этого о монорельсовом транспорте в России не было ничего слышно на протяжении примерно полувека. Только в 1872 году в Москве на политехнической выставке был экспонирован опытный участок монорельсовой дороги системы Лярского. (Это было за 4 года до постройки в США монорельса на паровой тяге для United States Centennial Exposition.) Также есть упоминания, что в 1874 году Хлудов соорудил в России однорельсовую дорогу для перевозки леса. Не исключено, что в этот период в России существовали и другие монорельсовые дороги.

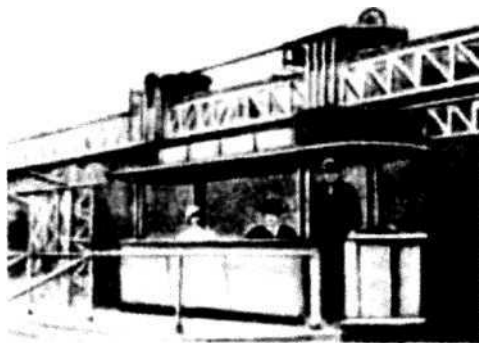
### **Использованные источники:**

"Пассажирские монорельсовые дороги", В.В. Чиркин, О.С. Петренко, А.С. Михайлов, Ю.М. Галонен. М., "Машиностроение", 1969г., 240с.

От паровоза до "ЛАДовоза". "Техника — молодежи", 10, 1971.

### **...ПЛЮС ЭЛЕКТРИФИКАЦИЯ**

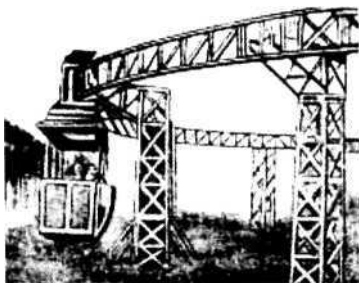
Прогресс в создании металлических конструкций в строительстве и начало промышленного использования электричества в конце 19 столетия вновь



пробудили интерес к монорельсу. Первые электрические монорельсовые дороги появились в США и Германии — например, в 1887 году в Нью — Джерси.

В марте 1897 года инженер И. Романов представил на заседании Русского технического общества действующую модель электрического монорельса. Проект получил финансовую поддержку, и в 1899 году в Гатчине начала работу первая в России электрифицированная монорельсовая дорога.

### **Монорельс Романова. Вагон с пассажирами на станции**



Длина двухпутной трассы составляла всего 0,2 км., вагоны на конечных остановках разворачивались на петле, подобно трамваю. Максимальный уклон на трассе составлял 18 тысячных.

Вагоны весом 1600 кг. были сделаны наподобие трамваев того времени и подвешивались на ферменной металлической эстакаде на высоте не менее 750 мм от земли. Тележки вагонов — двухосные, с одним ходовым колесом диаметром 120 мм. На каждой тележке также устанавливалось по две пары горизонтальных направляющих и стабилизирующих колес. Два двигателя мощностью по 6 кВт работали на постоянном токе напряжением 100 В. Система управления электроприводом предусматривала возможность рекуперативного торможения. (!).

25 июня 1900 года были проведены испытания монорельса с грузом 3200 кг, (т.е в 2 раза больше веса тары вагона), при этой нагрузке скорость движения составила 15 км/ч.

### **Монорельс Романова. Поворот вагона на кольце**

По свидетельству журнала "Железнодорожное дело" N 38 за 1900 год, дорога системы Романова имела преимущества перед известными на тот момент зарубежными конструкциями. Асимметричная схема подвешивания на открытой балке, с одной стороны, позволяла делать эту балку достаточно легкой и дешевой, а с другой - - позволяла выполнить тележки и привод надежными и удобными в обслуживании. Одновременно и независимо от Романова аналогичную систему создавал в Германии инженер Еуген Ланген. В 1900 году Вуппертальская монорельсовая линия длиной 10 километров связала Бармен и Эберфельд, а в 1903 году была продолжена до Вохвинкена.

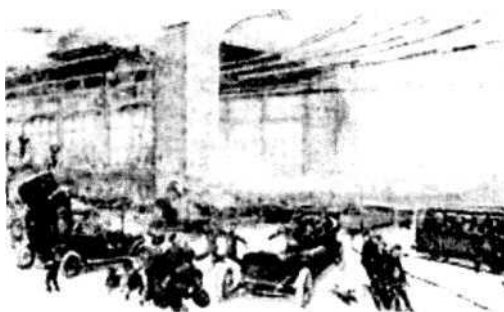
Выбор пал на монорельс в связи с трудностью строительства линии наземного транспорта через плотную индустриальную и жилую застройку; подвесная же дорога была проложена над рекой Вуппер без сноса домов. Дорога Лангена существует до сих пор и исправно работает более ста лет; подвесные же линии Романова так и не украсили город на Неве, и даже точно нельзя сказать, когда исчезла Гатчинская линия.

Почему монорельс Романова не прижился в С.-Петербурге - - трудно сказать. Во всяком случае, прокладывать линии над каналами Северной Венеции можно было бы с не меньшим успехом, чем над рекой Вупер, а в условиях наводнений монорельс был бы просто незаменимым.

В 1904 году инженер Кошкин разработал на базе системы Романова и в содружестве с ним проект монорельсовой дороги от Петербурга до Москвы, рассчитанной на скорость ни много ни мало — 200 км/час. Смелый проект был рассмотрен министерством путей сообщения и одобрен (!), но, к сожалению, не финансировался. Та же судьба постигла и другой совместный проект - монорельсовой дороги Москва — Нижний Новгород.

Самое интересное, что проекты Кошкина и Романова были для того времени даже более реалистичны, нежели попытки организовать высокоскоростное движение на обычной железной дороге. Монорельс практически исключает такие виды аварий, как наезд или столкновение с другими наземными видами транспорта. Если принять во внимание сравнительно большие интервалы пассажирского движения "путешественников из Петербурга в Москву" (1904 год все-таки), то дорога Кошкина могла функционировать и без автоблуживки. Кстати, за 75 лет эксплуатации Вуппертальской дороги на ней не произошло ни одного несчастного случая со смертельным исходом; редкая трамвайная линия может этим похвастаться.

Надо сказать, что монорельсу, как виду междугородного транспорта, в те годы пророчили большое будущее. Слева Вы видите открытку начала века, на которой изображен "вокзал будущего" в Москве.



#### **Использованные источники:**

"Пассажирские монорельсовые дороги", В.В. Чиркин, О.С. Петренко, А.С. Михайлов, Ю.М. Галонен. М., "Машиностроение", 1969г., 240с.

От паровоза до "ЛАДовоза". "Техника — молодежи", 10, 1971.

С.А. Адасинский. Городской транспорт будущего. М., "Наука", 1979г.

## МАГНИТОПЛАН ИЗ РОССИИ

Поиски новых, оригинальных схем монорельса продолжались. С давних времен люди мечтали о транспорте без колес, использующем для перемещения силы магнетизма. И вот в 1910 году Э. Башеле во Франции построил первую модель вагона на магнитном подвесе (по другим источникам, в 1912 году). Практически в то же время, в 1911 году профессор Томского технологического института Б.П. Вайнберг изобрел поезд на электромагнитной подвеске, приводимый в движение линейным синхронным электродвигателем. Использование электромагнитов позволяло реализовывать усилия, необходимые для поддержания на весу вагонов с пассажирами и позволяло видеть в магнитопланах не просто оригинальные физические опыты, а реальное транспортное средство.

В том же году Вайнбергом была построена экспериментальная стендовая установка с вагончиком весом 10 кг. Опыты, проведенные в 1911-1913 году оказались успешными (что просто потрясающе, ибо силовой полупроводниковой электроники в те времена еще не существовало).

Был разработан проект натурной экспериментальной трассы, на которой предполагалось достичь скорости 800-1000 км/ч (реконструкция показана на рис.).



Для разгона и торможения возле каждой станции предполагалось соорудить дополнительные линейные двигатели длиной около трех верст. Вагоны должны были двигаться внутри балки, представляющей собой полую трубу; для снижения сопротивления воздуха на скорости, близкой к звуковой, было предусмотрено создавать в трубе разрежение.

Идея Вайнберга в своем изначальном виде выглядела для обывателя столь же экзотична, как жюль — верновские полеты из пушки на Луну. Тем не менее ученые видели в ней рациональное зерно — не случайно известный отечественный популяризатор науки Перельман считал, что об этом проекте полезно знать каждому интересующемуся физикой. Идея магнитоплана была реализована в семидесятых годах в ряде стран, в частности, в Японии (экспериментальный участок, созданный авиакомпанией ДжАЛ). Более того, поезда с

магнитной левитацией считаются одним из наиболее перспективных направлений развития высокоскоростного монорельса...

### **Использованные источники:**

Н. Астахова. Кольцевая подушка. "Техника — Молодежи", 2, 1972.

Я. И. Перельман. Занимательная физика, кн.2. Ид. восемнадцатое, М. "Наука", 1972.

С.А. Адасинский. Городской транспорт будущего. М., "Наука", 1979г.

З.К. Сика, И.И. Куркалов, Б.А. Петров. Электродинамическая левитация и линейные синхронные двигатели транспортных систем. Рига, "Знание", 1988.

Валерий Антонов. ДжАЛ становится на рельсы. "Техника — Молодежи", 12, 1978.

Рисунок В. Овчинского.

## **ЗА ДАЛЕКОЙ ЗА ЦАРСКОЙ ЗАСТАВОЙ**

Первая мировая война, революция, интервенция, гражданская... Казалось бы, о каких монорельсах в России может идти речь? Но уже в 1921 году началось строительство 20-мильной линии (32 км) между Петроградом и Царским Селом по проекту Петра Шилового.

Это был так называемый монорельс с гироскопической стабилизацией, впервые запатентованный Луи Бреннаном в 1903 году. Вагончик с массивным маховиком под полом, как цирковой эквилибрист, сохранял равновесие на единственном железнодорожном рельсе. Таким образом, достигалась значительная экономия на стоимости железнодорожного пути, упрощалась конструкция стрелок.

Несмотря на необычный внешний вид, транспорт был вполне безопасным; при отключении питания боковые подножки можно было опустить прежде, чем гироскоп остановится.

В отличие от зарубежных прототипов, получивших распространение главным образом в качестве паркового транспорта, по линии Петроград — Царское село должны были курсировать сочлененные вагоны вместимостью 400 пассажиров. Была построена треть линии, но затем финансирование проекта прекратилось.

## **И В КАЖДОМ ПРОПЕЛЛЕРЕ ДЫШИТ...**

После окончания первой мировой войны быстрыми темпами развивается авиация. "Крылатые" технические решения из передовой отрасли заимствуют и создатели наземного транспорта.

В 1926 году шотландский инженер Джордж Бени построил первый монорельс с тягой от воздушного винта. По довольно громоздкой эстакаде был пущен цилиндрический обтекаемый вагон, напоминающий торпеду. Его толка-



ли пропеллеры, приводимые в движение электродвигателем. В 1929 году на новом опытном участке под Глазго была достигнута скорость 240 км/ч; тем самым было доказано, что монорельс может быть конкурентом гражданской авиации. Недостаток монорельса Бени был в том, что для него требовалась слишком сложная и дорогая эстакада. Но идея использовать воздушный винт в качестве движителя нашла свое развитие в СССР.

В конце октября 1933 года взору жителей Москвы предстало загадочное сооружение. Располагалось оно в Парке культуры и отдыха им. А.М. Горького и представляло собой уменьшенную копию "аэропоезда" -- сверхскоростного монорельса, запатентованного в том же 1933 году отечественным механиком — мотористом С. Вальднером (а.с. 35209).

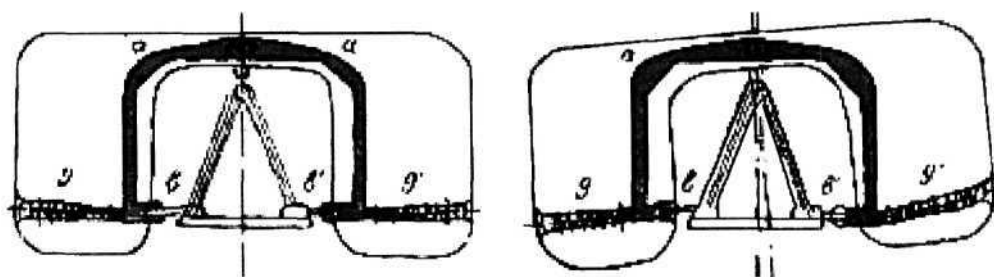


Создавая свою систему монорельса, Вальднер, как и Бени, в первую очередь уделял внимание обеспечению устойчивости движения вагона на высоких скоростях, но ему удалось найти решение, при котором эстакада получалась бы гораздо легче. На момент разработки такая схема не имела мировых аналогов.

В системе Вальднера две гондолы обтекаемой формы, соединенные в верхней части двумя расположенными тандемом крыльями малого удлинения, как бы охватывают дельта — образную ажурную балку.

Направляющие горизонтальные колеса размещены в нижних частях гондол, а опорные тележки располагаются в крыльях. Такая схема не случайно была названа Вальднером "треугольником устойчивости": она принципиально обеспечивала стабильность движения экипажа как в кривых, так и на прямых участках пути, без свойственных обычным железнодорожным экипажам колебаний виляния и отбоя.

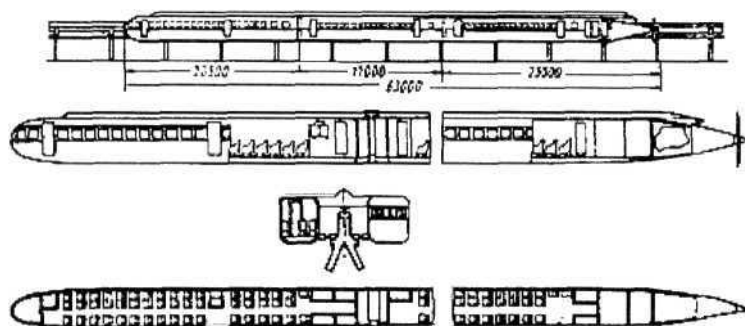
Изобретение Вальднера было признано особо важным. При Центральном институте сооружений НКПС была создана специальная группа — впоследст-



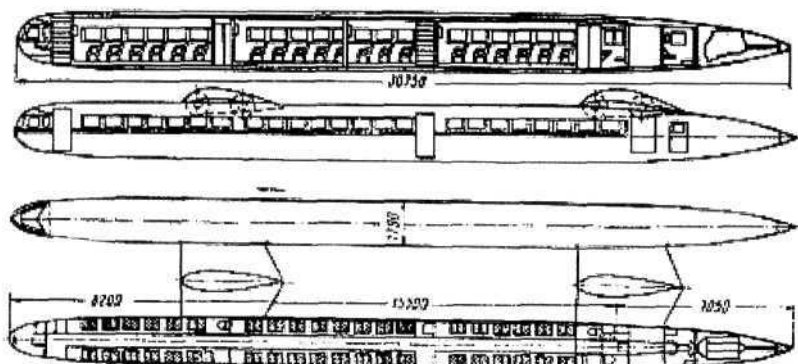
вии "Бюро аэропоезда Вальднера", во главе с самим изобретателем. Разработки велись совместно с ЦАГИ. В проектировании приняли участие профессора С. Дадыко, Н. Шусев, М. Бабичков, И. Рабинович, М. Гончаров, А. Некрасов, А. Туполев.



Исследуемая масштабная копия аэропоезда имела в длину 2,5 метров, винты приводились в движение двумя электродвигателями, ток подавался по рельсам. Кольцевая эстакада в Парке Горького имела длину 474 метра. Во время испытаний модель аэропоезда развивала скорость 120 км/ч, движение в прямых и кривых было стабильным. Более того, выявилась высокая устойчивость такой системы к снежным заносам; снег с экспериментальной эстакады не требовалось счищать даже тогда, когда в Москве из-за сильных метелей нарушилось движение трамваев (!).



В натуральную величину аэропоезд должен был вмещать 300 пассажиров - как послевоенный аэробус (рис. вверху). Два двигателя по 530 л.с. должны были обеспечить весьма значительную даже по нынешним временам скорость 250-300 км/ч. Для малозагруженных направлений был также разработан экипаж на 80 мест. (рис. внизу)



Продувка модели аэропоезда в ЦАГИ также подтвердила возможность достижения скорости 250 км/ч, а теоретические исследования показали, что при движении свыше 300 км/ч устойчивость экипажа должна быть "исключительно высока".

По результатам испытаний модели в 1934-1935 годах под Москвой на станции Северянин был создан и испытан опытный участок эстакады в натуральную величину. НКПС также принял решение соорудить опытное кольцо протяженностью около 8 км. около станции Бутово. В 1934 году началась рекогносцировка 500-километровой трассы Ташауз -Чарджоу, рассматривались возможности строительства и других линий. Предполагалось также построить опытный аэровагон на реактивной тяге для изучения его динамики на более высоких скоростях — нечто вроде прообраза СВЛ.

...Работы над аэропоездом были свернуты внезапно, несмотря на положительные результаты, и причины этого до сих пор неясны. По словам участвовавшего в разработке инженера Б. Качурина "так уж сложились обстоятельства, не относящиеся к сути самого изобретения, что бурно начавшиеся работы по его внедрению были прекращены в конце 1936 г. Все материалы — около 600 чертежей, не считая расчетов и текстового материала — попали в архив, где и находятся по сей день (август 1971 г., — О.И.)"

Идеи, заложенные в аэропоезд, до сих пор не устарели. Так, в 1971 году 43-летний инженер Марти Трент (США) запатентовал вариант системы Вальднера. За дальнейшую разработку поезда бралась фирма North American Rockwell, предполагалось довести скорость поезда до 500 км/ч. Проект не был доведен до внедрения — скорее всего потому, что это затронуло бы интересы авиакомпаний и автомобильных фирм.

### **Использованные источники:**

"Пассажирские монорельсовые дороги", В.В. Чиркин, О.С. Петренко, А.С. Михайлов, Ю.М. Галонен. М., "Машиностроение", 1969г., 240с.

*Б. Качурин.* Аэропоезд Вальднера. "Наука и жизнь", 8, 1971.

*Ю. Федоров.* Треугольник устойчивости. "Техника - Молодежи", 10, 1972.

От паровоза до "ЛАДовоза". "Техника — молодежи", 10, 1971.

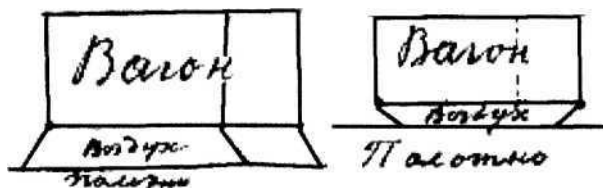
## **ПО ИДЕЯМ ЦИОЛКОВСКОГО**

Нет, речь здесь пойдет не о монорельсе с ракетным двигателем, и уж тем более не о космическом монорельсе. Просто основоположник теории межпланетных полетов занимался исследованиями и в области наземного транспорта.

В опубликованной в 1934 году работе общие условия транспорта К. Э. Циолковский рассматривал проблемы создания высокоскоростного монорельса на воздушной подушке для достижения скоростей 720 километров в час. При этом впервые было предложено использовать гибкие закраины (по современной терминологии, "юбка") для снижения расхода воздуха и мощности, по-

требной для создания воздушной смазки (см. рис. справа из рукописи Циолковского).

Монорельс на воздушной подушке был построен и пущен в эксплуатацию во Франции в конце 60-х годов.



#### Использованные источники:

Константин Циолковский. Будущее наземного транспорта, (сокращенная ретро — публикация в ж-ле "Техника — Молодежи", 3, 1965).

## ОПЫТ ВОПЛОЩАЕТСЯ В ТЕОРИЮ

Двадцатые - - тридцатые годы были не только временем выдвижения новых идей и смелых проектов. В это время создавалась и теоретическая база монорельсовых дорог.

К наиболее ранним из известных крупных научных трудов в сфере монорельса относится монография "Однорельсовые навесные железные дороги", 255 с, (авторы.: Тихоцкий В.П., Берлянд С.С. и Козлов С.В.) вышедшая в 1933 году в московском "Гослесиздате" по плану Всесоюзного научно-исследовательского института промышленного транспорта (НИИПТ).

Книга была посвящена грузовым промышленным монорельсам. В ней говорится как о действующих о Сипягинской, Солотчинской, Лысковской, Редкинской экспериментальных однорельсовых железных дорогах на эстакадных основаниях, опыт которых должен был послужить для создания более длинной Красноярской, а также об экспериментах, проводимых Научно-экспериментальным институтом гражданских промышленных и инженерных сооружений при Союзстрое ВСНХ СССР. В книге есть чертежи, схемы, фотографии, ссылки на более ранние работы Тихоцкого В.П.

Вячеслав Петрович Тихоцкий окончил курс в Институте инженеров путей сообщения в 1902 году 28 июня с правом на чин коллежского секретаря. Характерным для его работ было следование добрым традициям русской инженерной школы начала века, для которой никогда не были характерна ни рекламная подача новинки в научном исследовании, ни попытки одностороннего подбора негативных фактов по другим возможным путям решения заданной инженерной задачи. Напротив, автор публикации — не менее страстный и последовательный апологет монорельса — приводит список его достоинств (полтора десятка пунктов), затем список его недостатков (примерно такой же длины), а затем дает обстоятельный сравнительный анализ, когда и при каких условиях предпочтительнее строить так, а когда следует предпочесть иное решение.

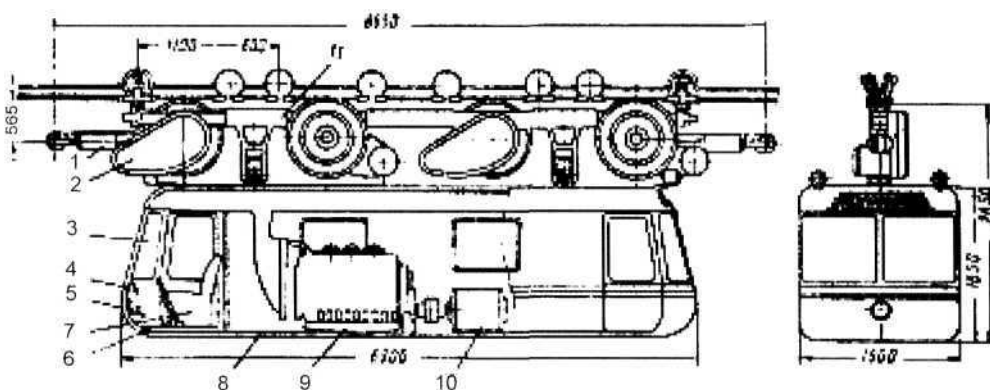
Наработанный теоретический задел стал своеобразным компасом для разработчиков монорельсовых дорог, сокращал время поисков и уменьшал вероятность грубых просчетов. Он послужил научной базой для целой серии проектов не только промышленного, но и пассажирского монорельса.

## МОНОРЕЛЬС НА КРАЮ ЗЕМЛИ

В начале 50-х годов на монорельс в СССР снова обратили внимание — на этот раз как на транспорт, удобный для перевозки грузов в условиях постоянных снежных заносов и пересеченной местности. В 1954 году был разработан проект Камчатской монорельсовой дороги, по которой предполагалось осуществлять как грузовое (в основном), так и пассажирское движение.

Эта монорельсовая дорога должна была стать самой длинной в мире (511 километров). Поскольку большая часть пути пролегла по малонаселенной местности, то вагоны было решено подвесить на небольшой высоте от земли (примерно 2 метра). На станциях расстояние до земли сокращалось до метра, для удобства перегрузки.

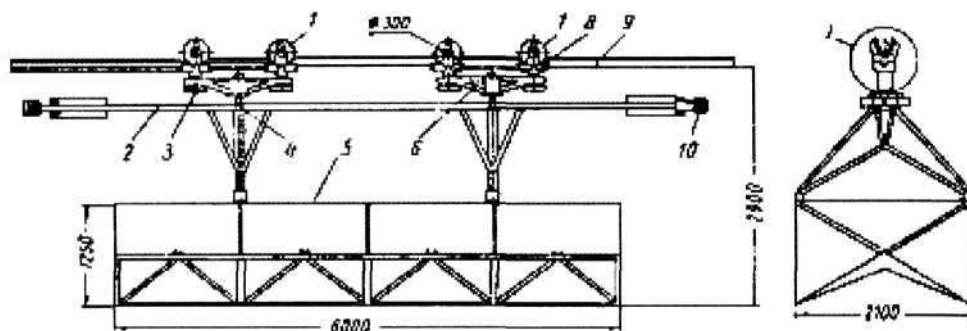
Дорогу намечалось сделать двухпутной. Путь было решено выполнить из балок с пролетом 15 метром, минимально-допустимые радиусы кривых по вписыванию вагона составляли 3 метра, радиусы на внутризаводских ветках принимались равными 10 метров, рекомендуемые радиусы для магистральной линии — от 100 до 200 метров, максимальные — 500 метров. Особенность пути Камчатской монорельсовой дороги - - гибкое соединение несущей балки с ходовым рельсом, что обеспечивалось путем подвески рельса к балке на тягах. Вес рельса составлял 24 кг/м., расстояние между точками подвеса — 1,5 метра. В целом стоимость эстакады получалась весьма низкой по сравнению с другими, существующими в мировой практике.



Тягу поездов должны были производить тепловозы с тяговым усилием до 8000 кг. (рис. сверху). Двигатель тепловоза -- ЯАЗ-206, 165 л.с, передача электрическая. Необычно был решен тяговый привод - - усилие создавали

обрезиненные колеса, прижимавшиеся к балке снизу. Конструкционная скорость была всего 35 километров в час, но она обеспечивала более быструю доставку грузов по сравнению с другими видами транспорта. Габариты тепловоза Камчатской дороги — 6,9-1,9-1,85 метра.

Товарные 25-тонные вагоны по проекту были длиной 11,8 м, шириной 2,25 м. и высотой 1,6 м. Были разработаны также легкие вагоны 8-2,1-1,25 метра и саморазгружающиеся (рис. внизу).



Для пересечения рек были спроектированные висячие мосты, отличающиеся наличием подпружиненных канатов и наклонным расположением подвесок балки, что уменьшало деформации моста от подвесной нагрузки и создавало поперечную жесткость.

Кроме Камчатской, планировалось также построить аналогичные монорельсовые дороги Омск — Сургут и Норильск — Салехард. Но эти проекты так и остались нереализованными до конца - - на Камчатке был построен только опытный участок дороги. Впрочем, опыт проектирования дешевой и экономичной монорельсовой линии еще может быть полезен при решении транспортных проблем Сибири и Заполярья.

#### **Использованные источники:**

"Пассажирские монорельсовые дороги", В.В. Чиркин, О.С. Петренко, А.С. Михайлов, Ю.М. Галонен. М., "Машиностроение", 1969г., 240с.

## **НА СМЕНУ ТРАМВАЮ**

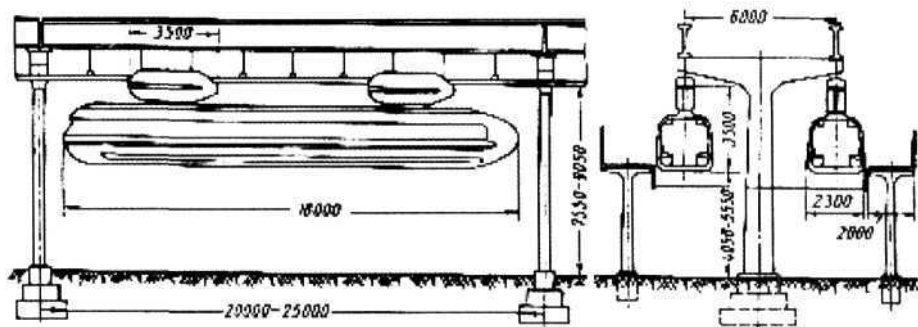
Со второй половины пятидесятих годов в Союзе снова возрос интерес к созданию пассажирских монорельсов для городского транспорта. Выяснилось, что метро не может решить всех проблем больших городов из-за высокой стоимости прокладки. Но если трудно вести дорогу под землей, то не проще ли — над ней?

В 1957 году был разработан проект пассажирской трассы Темир-Тау-Карагандинский металлургический комбинат, протяженностью 19,1 километра. Предполагалось использовать симметричную подвеску вагонов под балкой открытого профиля, на высоте от 4 до 5,5 метров. Подвижной состав -

обтекаемые моторные вагоны длиной 19 метров. Время поездки должно было составить 15,3 минуты против 42 минуты на трамвае, т.е. средняя скорость поездки должна была составить 80 км/ч.

Тележки монорельсовой дороги были спроектированы только моторными. Они имели ходовые безребордные колеса, катящиеся по рабочим дорожкам нижних полок двутавровых балок и четыре направляющих ролика. Каждый вагон подвешивался к тележкам. На каждой тележке было предусмотрено установить по одному тяговому электродвигателю постоянного тока последовательного возбуждения с часовой мощностью 80-100 кВт, передающему тяговое усилие через нижнее тяговое колесо с пневматической шиной высокого давления.

Важно отметить, что проектная стоимость монорельса, составившая по расчетам 0,241 млн. рублей на километр, оказалась существенно ниже стоимости трамвайной линии (0,34 млн. рублей, на километр).



## Проект монорельсовой дороги для Темир-Тау

В 1960 году для Магнитогорска были спроектированы два варианта пассажирской монорельсовой дороги — 21,6 км и 16,5 км. Путь представлял собой железобетонные балки двутаврового сечения длиной 20 и 30 метров. Поезда - двухвагонные, вместимостью по 300 человек. Средняя эксплуатационная скорость — 50 километров в час. При проектировании выявились трудности, связанные с необходимостью пересечения многочисленных железнодорожных (в том числе электрифицированных) путей, газопроводов и реконструкции или пересечения ряда зданий или промышленных сооружений. Вероятно, по этой причине дорога не была построена.

В 1961 году был спроектирован монорельс для Миасса. Путь было решено выполнить в виде железобетонной эстакады с балкой коробчатого сечения. Подвижной состав на этот раз был спроектирован навесным, по схеме подвески, применявшейся фирмой Алвег. Данная система позволяла использовать для балок эстакады не сталь, а железобетон, что давало экономию капитальных вложений. Недостатком системы Алвег было то, что центр тяжести вагона

находился значительно выше точки опоры, что вызывало значительные усилия на направляющие колеса в кривых.

Пассажирские вагоны для Миасса проектировались на основе технического задания на проектирование вагонов для монорельсовой дороги в Москве, что позволяет предполагать возможное наличие еще одного подобного проекта для Москвы. Вагон длиной 16 метров и вместимостью 150 пассажиров весил 19 тонн. Вагон имел две ходовые тележки с двумя осями и четырьмя ведущими и восемью направляющими колесами.

#### **Использованные источники:**

"Пассажирские монорельсовые дороги", В.В. Чиркин, О.С. Петренко, А.С. Михайлов, Ю.М. Галонен. М., "Машиностроение", 1969г., 240с.

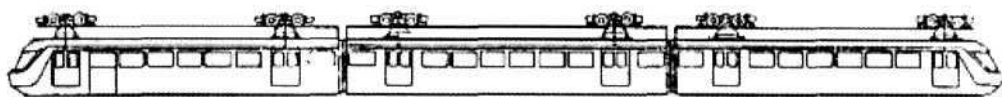
### **НЕ ТОЛЬКО В ОБЛАСТИ БАЛЕТА**

В начале 60-х годов в Москве было решено построить целую разветвленную сеть монорельсовых дорог — к аэропортам Внуково, Домодедово, Шереметьево, в зону отдыха Клязьминского водохранилища, а также по малому кольцу Московской ж.д. Трассы к Внуково и Шереметьево прорабатывались в вариантах с выходом к центральному аэровокзалу на Ленинградском проспекте (длина линий 33 и 27,1 км.) или к периферийным станциям метро (14,8 км. и 17 км. соответственно). От станции метро Каширское Шоссе до Домодедово намечалось протянуть линию 32 километра и трассу такой же длины — от Рижского вокзала до Клязьминского водохранилища. И это было только начало. После Москвы намечалось строить монорельс в 19 городах СССР, включая Киев, Ленинград, Харьков, Горький, Тбилиси, Новосибирск, Волгоград...

Известно, что в то время одним из сторонников строительства монорельсовых линий в СССР был Генеральный секретарь ЦК КПСС Н.С.Хрущев. В книге "Воспоминания (книга 1)" он отмечал: "Во Франции проложены экспериментальные линии электрических поездов на монорельсе... За ним будущее, потому что его можно поднять повыше. Следовательно, улицы разгрузятся для наземного транспорта." Интересно, что спустя десятилетия практически тот же аргумент — разгрузить улицы для наземного транспорта — будет фигурировать в числе основных при строительстве Московского монорельса нового тысячелетия...

В 1963 году были выработаны требования к подвижному составу московского монорельса, были и созданы проекты. В частности, в том же 1963 году Мытищинский завод, производивший вагоны для Московского метрополитена, создал проект трехвагонного монорельсового поезда для линии от станции "Юго-Западная" до аэропорта "Внуково". Это поезд был длиной 52 метра, шириной 2,7 метров и высотой 2,9 метра. В поезде было 224 места (из них 48 откидных), по 4 в ряду, а всего должен был вмещать 315 пассажиров и развивать скорость до 150 километров в час.

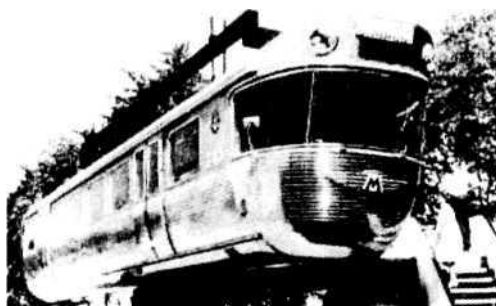




## **Проект монорельса Мытищинского завода, 1963 год**

В проекте Мытищинского завода была взята за основу так называемая система аэрометро, впервые реализованная во Франции фирмой Сафеже. В этой системе использовались балки коробчатого сечения, что снимало проблему защиты дорожек качения и контактных рельсов от снежных заносов, дождя и обледенения.

Московские монорельсы этого периода в технической литературе упоминаются только как проекты, и можно подумать, будто все эти разработки оставались на бумаге. Но это не так...



## **Монорельсовый вагон "КБ", 1967г**

На юбилейной экспозиции ВДНХ, подводящей итоги полувекового развития послереволюционной России, среди других достижений техники внимание посетителей привлекал необычный обтекаемый вагон. Это была головная секция трехсекционного скоростного монорельсового поезда для будущей линии Автозаводская — Нагатино.

На этой двухпутной линии длиной 8,5 км. было запроектировано три станции: Автозаводская, Нагатино и Коломенское, за ст. Коломенское должна была быть построена однопутная ветка 700 м до депо. Максимальные уклоны на линии — 50 тысячных, горизонтальные радиусы кривых — 400, 600 и 1500 м, вертикальные — 3000 м и 5000 м. Расстояние от низа вагона до поверхности земли должно было составлять 4,5-9 м. в зависимости от профиля местности. Станцию "Автозаводская" было решено сделать подземной, совмещенной с

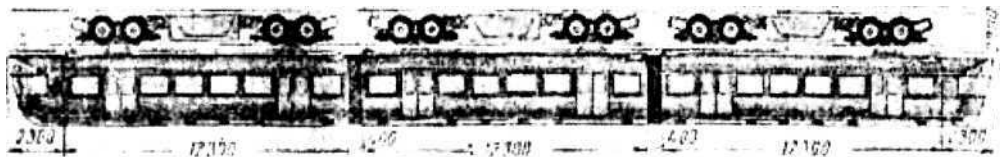
одноименной станцией метро, и на протяжении 0,85 км. путь монорельса должен был быть подземный от Автозаводской до Москва — реки.

Участок "Автозаводская — Нагатино" находился на направлении поселка Ленино, который становился районом массовой застройки. Ожидалось, что в перспективе пассажиропоток может освоить только метрополитен. Поэтому сразу же рассматривался и второй вариант — продление метро от Автозаводской до Нагатино с доведением до Ленино, а монорельс должен был соединить Нагатино с ж.д. станцией Коломенское. Протяженность дороги должна была составить 5,2 км., а станция Нагатино проектировалась в двух вариантах — надземной и подземной.

Эстакада по проекту представляла собой балки коробчатой конструкции, с расположением дорожек качения и контактных рельсов внутри балок. Балки предполагалось делать в нескольких вариантах — железобетонные и стальные, пролет 30 м. Опоры — железобетонные Т-образные (на одной опоре одновременно два пути), на участках с повышенным расстоянием от земли — П-образные, на однопутном участке — Г-образные.

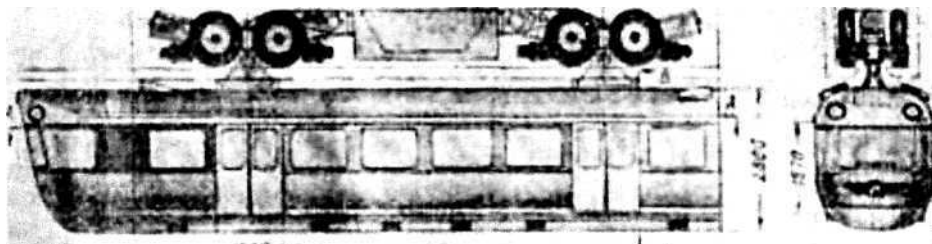
Унификация стальных и железобетонных балок в принципе позволяла первоначально строить путь с минимальными затратами, используя железобетонные балки, а затем, после того как линия окупится и по мере выхода из строя железобетонных балок заменять их более легкими и долговечными стальными (одновременно снижалась нагрузка на опоры).

Трехсекционный электропоезд монорельса имел общую длину 41,5 м, ширину 2,5 м и высоту 2,8 м. Все секции моторные, соединялись автосцепкой и имели переходы. Средняя секция отличалась от головных отсутствием кабины. Сиденья в вагоне располагались продольно, как в вагонах метро. Число мест в каждом вагоне одинаковое, всего мест в поезде -- 132 для сидения и 345 - - общее, т.е. вагон был рассчитан на большой пассажиропоток. Вес пустого вагона 14 т, с пассажирами — 22 т, в часы пик допускалась перегрузка до 25 т.



Общий вид монорельсового поезда "КБ" (с синьки чертежа)

Если проект Мытищинского завода 1963 года был максимально близок к уже испытанным фирмой Сафеже аналогичным техническим решениям аэрометро, то монорельс КБ, наоборот, был попыткой создать свою оригинальную конструкцию при сохранении того же принципа подвешивания. Каждый вагон

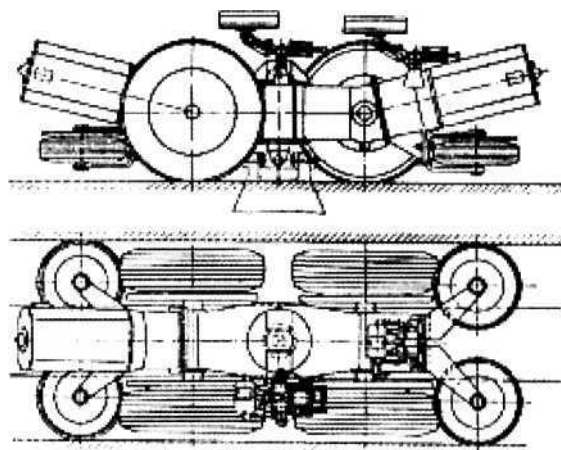


Головной вагон "КБ" (с синьки чертежа)

имел по две моторные тележки на пневматиках (по 4 опорных 1140 мм и 4 направляющих 680 мм), давление 13-14 кг/см .

База опорных колес 1350 мм, направляющих 2070 мм. Рессорное подвешивание кузова — гидropневматическое, размещалось в центре тележки. Вагоны были оборудованы электрогидropневматической системой стабилизации во всех плоскостях, система стабилизации дублирована.

На каждой тележке наклонно располагались по два двигателя по 110 кВт. Вес тележки — 3,75 т, минимальный радиус проходимых кривых — 50 м. Токосъем — от контактных рельсов, электроаппараты размещались в коробе



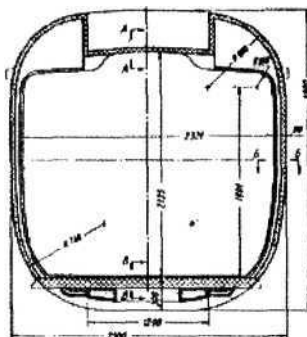
Тележка монорельса "КБ"

между тележками, что, хотя и усложняло обслуживание, но зато обеспечивало высокую безопасность пассажиров в случае загорания.

Кузов выполнен несущим, из алюминиевых сплавов — лист Д16АТ, профили В95АТ, поковки АК6 и АК8, лист АМг6. Внутренняя отделка вагона была сделана по типу салонов пассажирских самолетов того времени - широко использовались поролон, стеклопластик, пенопласт, заменители кожи. Пол

вагона был покрыт армированным пеноматериалом марки ПХВ-1 с поверхностным слоем релина. Для звуко- и теплоизоляции использовался пенопласт и стекловолокно толщиной примерно от 20 до 30 мм.

Отечественный вагон имел лучшие характеристики по сравнению с наиболее близким аналогом того времени — вагоном Сафеже (Франция), вариант 2 для Парижского монорельса; в частности, удельный вес на 1 м. длины был в 1,35 раза меньше. А вес на одного пассажира у отечественного монорельса был



Кузов вагона "КБ"

всего 122 кг по сравнению со 149 кг у вагона фирмы Сафеже.

Автор этого монорельсового вагона, к сожалению, неизвестен, т.к. проектировщик и изготовитель монорельса в литературном источнике 1969 года везде обозначен аббревиатурой "КБ". На единственном известном снимке, опубликованном в журнале "Юный техник", виден только номер — "245"...

#### Использованные источники:

"Пассажирские монорельсовые дороги", В.В. Чиркин, О.С. Петренко, А.С. Михайлов, Ю.М. Галонен. М., "Машиностроение", 1969г., 240с.

## ВЕРХОМ НА СТАТОРЕ И ЭНТУЗИАЗМЕ

История отечественного монорельса с линейным асинхронным двигателем (ЛАД) началась с первомайской демонстрации. Группа сотрудников Киевского политехнического института сделала ЛАД для праздничного стенда, мощностью всего 15 Вт. Затем изготовили 1,5 - - киловаттный двигатель, который возил вагончик на опытной 80 — метровой эстакаде.

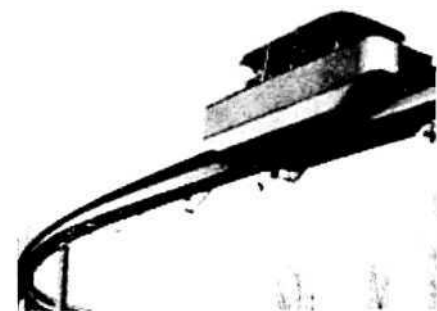
Работали поначалу на голом энтузиазме. Постепенно к ученым присоединились инженеры с завода имени Дзержинского. Выкраивая время, за счет обеденных перерывов, сна и отдыха, сделали двигатель на 5 кВт. В 1966 году был создан вагон на 4 пассажиров с линейным двигателем 10 кВт. Это и позволило получить от правительства Украины средства на строительство кольцевой дороги длиной 525 метров для Выставки передового опыта в Киеве.

Эта дорога была построена в 1967 году. Ее авторы — сотрудники КПИ А. Шаповаленко, К. Быков, А. Вишникин и с. Ребров. Следует отметить также большой непосредственный вклад директора завода Г. Ижели.

Дорога представляла собой кольцевой путь 0,55 км на очень легкой эстакаде из двутавровых металлических балок. Высота подвеса для обеспечения свободного проезда транспорта была относительно большой — 6...9 метров. Небольшие вагоны (вместимостью всего 8 человек) развивали скорость до 40-50 км/ч. Был использован двигатель оригинальной конструкции, в котором статор был жестко связан с рельсом с помощью нажимных роликов, и упруго — с корпусом вагона. Кроме того, сам статор был выпол-

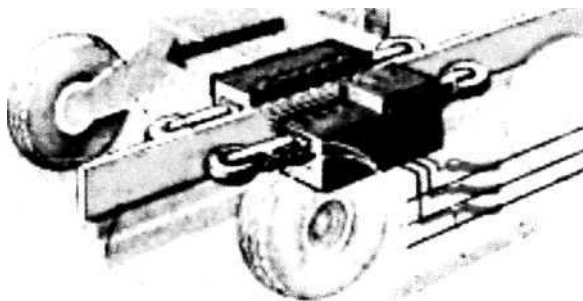


нен гибким на шарнирах для прохождения крутых кривых. Такая конструкция позволяла существенно снизить вес ЛАД при том же тяговом усилии, по сравнению с применявшимся за рубежом жестким креплением статора к вагону. Общий ее вид Вы можете посмотреть на рисунке слева внизу.



Фактически этот парковый монорельс являлся стендом-макетом для отработки конструкции монорельсовых дорог. Успешный опыт его эксплуатации позволил создавать более мощные конструкции. К 1970 году была на экспериментальном участке пути в Коммунарке была создана и испытана тележка с двигателем 40 кВт для вагона на 44-60 пассажиров.

Было решено построить в Киеве монорельсовую трассу от станции метро "Гидропарк" до моста им. Патона, по которой должен был курсировать вагон на 120 пассажиров с максимальной скоростью 120 км/ч. В свою очередь, эта



Общий вид тележки с линейным двигателем киевского монорельса

линия также должна была, помимо основного назначения, служить исследовательским полигоном для создания сверхскоростных междугородних линий. В том же 1970 году была также спроектирована линия "Березняки — Гидропарк" длиной 3,5 км. Однако в семидесятых годах работы над данными проектами были остановлены.

#### **Использованные источники:**

*В. Степанов.* Дело пойдет на ЛАД! "Техника — молодежи", 3, 1970.

От паровоза до "ЛАДовоза". "Техника — молодежи", 10, 1971.

Рисунок Н. Рожнова.

## **ПОЛЕТ НАД ПОТОКОМ МАШИН**

В 1977 году была выбрана трасса для монорельса, который должен был стать первым в СССР поездом на магнитной подушке. Протяженность трассы должна была составить 11 км, она должна была связать центр столицы Казахстана с ее новыми микрорайонами. Разработка делалась под эгидой казахского отделения института Промтрансниипроект (управляющий отделением В. Петухов), автор проекта Н. Карасев, главный инженер проекта М. Лесовиченко (на снимке внизу — у действующего макета монорельса).



Движение поездов скоростной пассажирской транспортной системы или СПТС, как она официально называлась, предполагалось осуществлять по эстакаде высотой 5-6 метров, по которой прокладывалось двухколейное полотно с бегущим магнитным полем, ширина полотна около 7 метров. Опоры с двухметровым основанием было решено установить на разделительных полосах проезжей части улиц.

Поезд СПТС должен был состоять из нескольких вагонов. По проекту управление поездом автоматизированное, на долю водителей оставалось лишь контролировать по приборам работу систем.

В конце 70-ых годов на полигоне института ВНИИПИТранепрогресс в Раменском, в рамках проекта СПТС в г.Алма-Ате, совместно с инженерами и рабочими завода "Газстроймаш" был построен и испытан на экспериментальной трассе опытный экземпляр вагона на магнитном подвесе (фото справа).

Вместимость вагона составляла 35 человек, длина вагона составляла 9 метров, а вес — 8 тонн, зазор подвешивания был принят 20 мм.



К сожалению, трасса СПТС в Алма-Ате так и не была построена.

## ОТ МОСКВЫ ДО ЧЕРНОГО МОРЯ

Вообще в семидесятые годы работы по созданию монорельса на магнитной подвеске велись целым рядом организаций, существовал даже координационный план работ по развитию такого вида транспорта. Планом было предусмотрено создание макетных образцов и строительство опытного полигона для их испытаний.

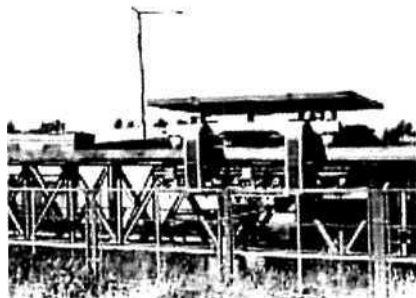
Во ВНИИЖТ была создана большая лаборатория. Силами ВНИИЖТ были разработаны технические условия на скоростной междугородний магнитоплан для направления Москва-Юг. Его скорость должна была составлять 400 километров в час, поезд должен был состоять из 10 вагонов весом 40т и вмещающих по 75 пассажиров. Зазор магнитного подвеса должен был составлять 25-30 мм. При интервале движения в 6 минут суточная провозная способность должна была достигнуть 100000 пассажиров. В качестве пути предполагалось использовать железобетонную эстакаду. ВНИИЖТ и ВНИИ электромеханики разработали проект такого поезда.

Аналогичные работы вел Ростовский ИИЖТ и ряд других организаций в системе МПС. В Днепропетровском и Ленинградском институтах железнодорожного транспорта также велись работы по созданию магнитоплана с подвешиванием на постоянных магнитах — в связи с созданием новых материалов с высокими магнитными характеристиками к этому направлению возник практический интерес; был построен опытный макет.

В 70-80 годах большой объем работы был выполнен по договорам с ВЭЛНИИ (Новочеркасск) — головной организацией по линии Минэлектротехпрома в рамках финансирования Государственной научно-технической программы развития новых видов транспорта. В программе участвовал ряд вузов: ЛПИ (по подвешиванию и линейным двигателям), создатели ранее упомянутого киевского монорельса из Киевского политехнического ин-та и 3-да им. Дзержинского, Днепропетровское отделение АН УССР — разрабатывали криостат и СЭМ для ЭДП, Ереванский политехнический построил полигон для испытаний магнетоплана вдоль реки Раздан (который прекратил работу в связи с событиями в НКАО в конце 80-х). Был задействован целый ряд организаций в Белоруссии, Латвии, а в Омске построен полигон для испытания систем токосъема при высоких скоростях).

Магнитоплан ВЭЛНИИ на опытном участке; вариант ходовой части без кузова.

В конце 70-х начале 80-х практически все кафедры МИИТ участвовали в программах работы по магнитопланам. Причём ус-



пешные работы продолжались и при перекрытом финансировании.

#### **Использованные источники:**

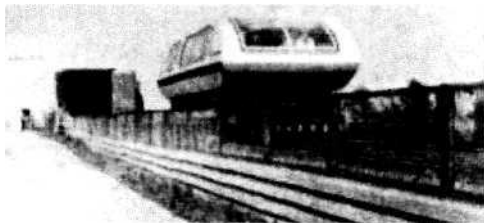
*С.А. Адасинский.* Городской транспорт будущего. М., "Наука", 1979г

### **БЕЗ ШУМА И ПЫЛИ, ПО ВНОВЬ УТВЕРЖДЕННОМУ ПЛАНУ**

Во второй половине восьмидесятых годов на полигоне инженерно-научного центра ТЭМП (транспорт электромагнитный пассажирский) был построен опытный участок монорельсовой дороги на магнитной подвеске с линейным электродвигателем (фото справа).

После успешных испытаний работа нашла поддержку у муниципальных властей столицы — 13 ноября 1990 года исполком Моссовета принял решение "об организации работ по созданию скоростного экологически чистого транспорта с линейным электродвигателем".

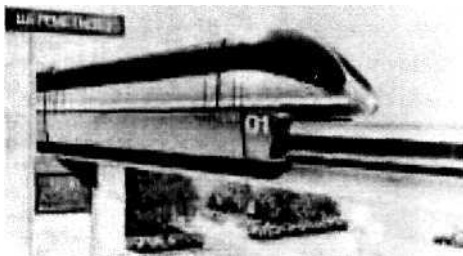
К 1992 году НИиПИ Генплана Москвы разработал проекты двух линий. Первый маршрут — аэропорт Шереметьево - - Тушинский спортивный аэродром — зона отдыха "Серебряный Бор" - - детский парк (на то время проектный) - - Дом Правительства на Красной Пресне. Второй маршрут должен был связать районы Чертаново, Ясенево и Бутово. По проекту величина эстакады должна была быть 5-6 метров. Среднетехническая скорость на первом маршруте должна была быть 100 километров в час, на втором — 40. Таким образом, конструкционная скорость должна была быть где-то под 200.



Вагон опытной трассы в Раменском представлял собой укороченный вариант головной секции проектного поезда из двух - - трех секций, каждая вместимостью порядка 60 сидячих мест (рисунок слева).

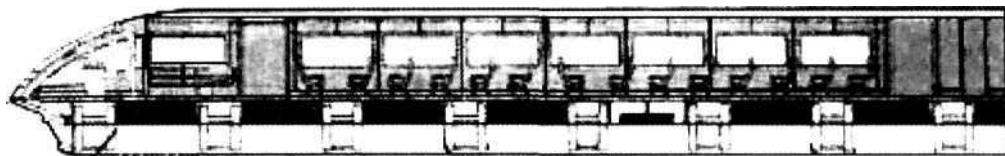
Опытный вагон, судя по фотографии, вмещал порядка 15 человек.

По сообщениям прессы, был использован линейный электродвигатель оригинальной конструкции, дающей "большой выигрыш в устойчивости вагона". В днище вагон размещены электромагниты подвеса и стабилизации. Высота левитации — 10 мм. Система управления подвесом учитывает возможные дефекты при монтаже пути, вагон оснащен бортовым компьютером. Стоимость линии, по расчетам, должна была быть в 3 раза дешевле стоимости метрополитена.





По данным испытаний опытного вагона, уровень шума на расстоянии 25 метров был равен 60-65 дБ, что на 10 дБ ниже, чем у трамвая. Для защиты пассажиров от электромагнитного поля предусматривались экраны.



В 1992 году на работах по данной теме стали сказываться экономические трудности, связанные с разрывом экономических связей между республиками бывшего Союза. По мнению корреспондента журнала "Техника — Молодежи" А. Бородулина, "реализация подобного проекта прошла бы, пожалуй, легче в застойные времена, чем в перестроечные".

К 1999 году новой информации о реализации данного проекта не поступало.

#### **Использованные источники:**

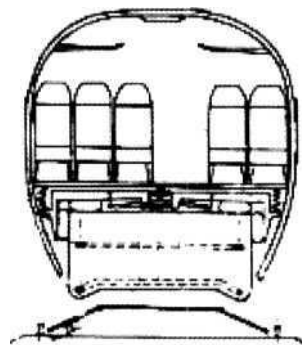
Александр Бородулин. Магнитные страдания. "Техника - - Молодежи", 1-2, 1992.

## **САМОЛЕТ САДИТСЯ НА РЕЛЬСЫ**

В восьмидесятых годах учеными Физико-энергетического института АН Латвийской ССР был создан весьма оригинальный проект монорельса на магнитной подушке для перевозок со скоростью 500 километров в час.

Вагон предполагалось создать на базе уже проверенного в эксплуатации фюзеляжа транспортного самолета Ил-18. Длина такого вагона, по проекту вмещавшего 100 пассажиров, составляла 36 метров, ширина 3,5 метра, высота 3,85 метра, а масса — 40 тонн. Под полом вагона размещались криостаты со сверхпроводящими магнитами, которые соединялись с кузовом через рессорное подвешивание (т.к. при скорости 500 километров в час возмущения от пути невозможно гасить только за счет зазора в магнитной подвеске, принятого равным 22 миллиметра). Преобразователи частоты управлялись бортовым компьютером.

Во время стоянки и перемещения в депо и на экипировочные участки вагон должен был двигаться на колесах по рель-

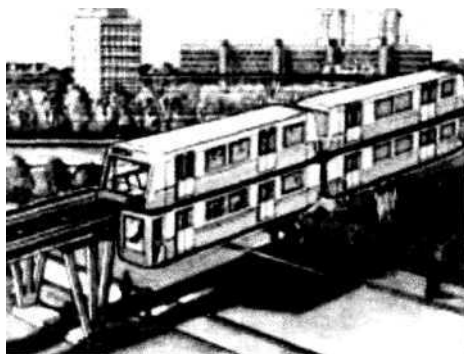


сам с колеей 3 метра, при движении на перегоне колеса убирались. На эти колеса экипаж также должен был "приземляться" при аварии системы магнитной подвески.

Была построена экспериментальная модель с вагоном массой 3,2 килограмма. В 90-е годы сведений о продолжении работ по данному проекту не поступало.

#### **Использованные источники:**

*З.К. Сика, И.И. Куркалов, Б.А. Петров.* Электродинамическая левитация и линейные синхронные двигатели транспортных систем. Рига, "Знатьне", 1988.



## **МОНОРЕЛЬС НОВОГО ТИПА**

Более полутора веков монорельсовые дороги делились на два типа: подвесные (вагон под балкой) и навесные (вагон на балке). Но вот в 1989 году на "украинской ВДНХ" появилась модель - - копия проектной монорельсовой дороги в масштабе 1:5, вагоны по отношению к балке располагались там не сверху, и не снизу, а ... сбоку.

Автором этой оригинальной системы был инженер Евгений Иванович Попов, а финансировалась разработка Киевским центром НТТМ "Прогресс".

Собственно, идея боковой подвески давно витала в воздухе и в прямом и в переносном смысле. Еще в шестидесятых годах в промышленности нашли распространение однобалочные мостовые краны, у которых тележка подвешивалась сбоку балки. Тем не менее до Попова никто не предлагал перенести эту схему на пассажирский монорельс.

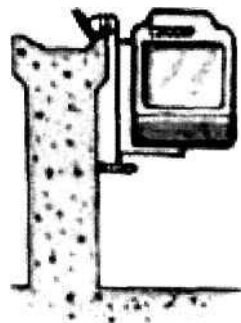
Боковая подвеска вагона (см. рисунок) дает целый ряд существенных преимуществ:

а) для двухпутного движения можно использовать одну балку;

б) на значительной части пути балка может быть выполнена в виде стенки из железобетонных панелей или монолитного железобетона.

в) благодаря устойчивости вагона при боковой подвеске можно снизить вес ходовых частей.

Другая особенность системы Попова -- сбалансированная подвеска вагонов на восьми катках, что позволяет выполнять путь в вертикальной по-



скости не из кривых балок, а из прямых, составленных под углом.

Поезд монорельса Попова должен был состоять из десяти двухэтажных вагонов с общим числом посадочных мест 960. Конструкционная скорость — 120 километров в час. Стоимость строительства по расчетам выходила в 20 (!) раз дешевле, чем у метро, а при цене билета 5 копеек в ценовом масштабе 1989 года срок окупаемости должен был составить около 4 лет.

Сведений о проектировании конкретных трасс для данной системы монорельса в прессе не появлялось.

#### **Использованные источники:**

Игорь Лебедев. И все-таки монорельс! "Техника — Молодежи", 5, 1989.

## **МАГНИТОЛЕТЫ ПЕСЧАНЫХ КАРЬЕРОВ**

Подвеска на постоянных магнитах привлекала создателей монорельсов с начала 20 столетия. В США даже существовали планы постройки дорог протяженностью до 5000 км., но они так и не были осуществлены.

Объективных причин было две. Во-первых, такая подвеска только кажется простой. "Очевидная" ее схема - - магнит отталкивается от магнита - - не позволяла долгое время создать трассу длиной более 20-30 метров. Это связано с тем, что для получения нормальной грузоподъемности из постоянных магнитов необходимо было создавать большие плоские платформы, которые должны были отталкиваться на зазоре до 12мм. Реализация этих требований приводила к очень высоким требованиям к путевой структуре и, как следствие, дорогой трассе. Другой причиной была высокая стоимость постоянных магнитов.

Однако со временем промышленность освоила выпуск магнитов из магнитотвердых ферритов, стоимость которых при массовом изготовлении стала ниже стоимости асфальтового покрытия. С другой стороны, принципиально новый вид подвески, предложенный Александром Искандеровым, в котором плоскости магнитов располагались не горизонтально, а вертикально, оказалось гораздо проще реализовать, чем традиционные схемы. Кроме того, в новой схеме подвески при слишком большом вертикальном смещении тележки (например, при колебаниях на неровностях пути), возникает сила, возвращающая экипаж обратно на путь.

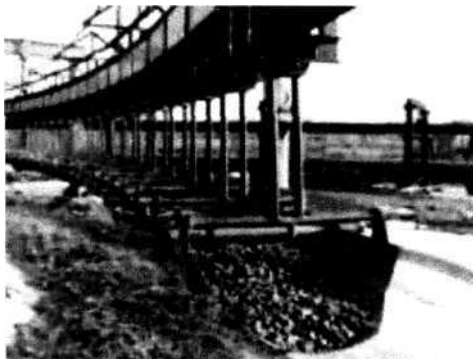
Система оказалась настолько дешевой, что ее сразу же попытались использовать... в карьерном транспорте как альтернативу конвейерам. Действительно, у монорельсового поезда нет истираемой и рвущейся ленты, быстро изнашивающегося в запыленном воздухе привода, да и усилие на перемещение груза несоизмеримо ниже. В 1987 году была построена опытная установка (см. фото) с протяженностью пути 250 м и массой опытного состава 6 тонн.

В течении 3-х лет этот состав практически непрерывно со скоростью до 3 м/с проходил ресурсные испытания. За это время были разработаны также проекты аналогичных систем для ряда карьеров (перевозка щебня, песка и

т.п.). Были созданы два проекта пассажирской монорельсовой дороги — для ВДНХ и для зоопарка в Ташкенте. К сожалению, эти проекты были остановлены с началом промышленного кризиса. Реально достигнутая на практике грузоподъемность системы составляет 400 кг. на погонный метр трассы.

В 1990-91 год такая транспортная система также была построена для НПО "Интеграл" в Минске, для перевозки пластин кремния между технологическими участками производственного цеха — здесь было важно то, что установка практически не создает пыли.

Грузовой магнитный монорельс состоял из 40 станций с вертикальными бесконтактными подъемниками (тоже на магн.подв.) между которыми по инерции перемещались 10 транспортных тележек. Приводом тележек служили линейные двигатели статоры которых размещались на каждой станции и на длинных перегонах. На станциях линейные двигатели могли остановить тележку с точностью до 1 мм или подтолкнуть ее дальше.



Монорельс на магнитной подвеске НПО "Интеграл"

В этой системе нет токосъемов и приводных колес, поэтому она получилась не только непылящей но и очень надежной. Интересно, что разработки и первые испытания этой системы проводились одновременно с японскими конкурентами, которые в то время так и не смогли сделать надежный магнитный подвес и заменили его полиуретановыми колесами...

## И ВНОВЬ ПРОДОЛЖАЕТСЯ БОЙ...

В 90-х годах, несмотря на общий спад в промышленности, на НЭВЗ продолжались разработки магнитоплана. Особенностью создаваемой системы было то, что устройства тяги и подвеса экипажа располагались под козырьком путевой балки, чтобы снизить влияние снега и гололеда. У аналогичных зарубежных конструкций, например, HSST, путевой элемент линейного двигателя располагался сверху балки, а поскольку зазор между ним и индуктором должен быть очень малым, то небольшое скопление снега или наледь могли просто

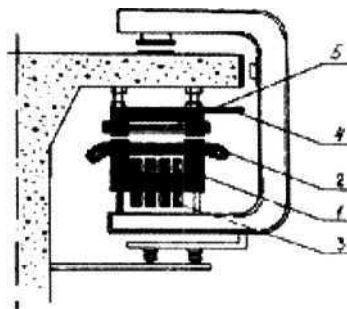
привести к аварии. Расположение же подвески и двигателя "под крылышком" балки позволяло сделать сверху зазор между балкой и экипажем в разумных пределах большим.

## МОНОРЕЛЬСОВЫЙ БУМ?

Казалось бы, рассказ об отечественном монорельсе можно было бы закончить на оптимистичной ноте.

2004 год должен войти в историю как год открытия действующей монорельсовой линии в г. Москве.

Распоряжением мэрии Москвы было решено создать экспериментально-испытательный монорельсовый комплекс на базе ГП "Московский институт теплотехники". В 2001 году была построена опытная трасса, на которой производились натурные испытания подвижного состава швейцарской фирмы Intamin (People Mover P8), а в 2003 году планируется сдать в эксплуатацию пассажирскую линию районе станций метро "ВДНХ" и "Тимирязевская".



Однако уже во время строительства возникли проблемы. Прежде всего, выбор эффективной зарубежной системы был произведен без достаточного технического анализа особенностей ее эксплуатации. По признанию главного инженера АО ММД Игоря Митрофанова, (Михаил Шлаен. Монорельс помчит с ветерком. ГАЗЕТА "МОСКОВСКИЙ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНИК" 25.01.2003) тяговый привод данной системы неудовлетворительно работал в наших климатических условиях: "Случись вдруг гололедица, вагоны будут буксовать или перестанут тормозить. Надо оснастить несущую балку подогревом, что дорого". Поэтому в срочном порядке начали создавать вариант, где тяга создавалась линейным двигателем, который, по рисунку, приведенному на официальном сайте АО ММД, опять-таки расположен на верхнем листе балки.

Источник: [www.admin.debryansk.ru](http://www.admin.debryansk.ru)

## 6.10. Применение магнитного поля в георазведке

Магнитометрическая, или магнитная, разведка (сокращенно магниторазведка) — это геофизический метод решения геологических задач, основанный на изучении магнитного поля Земли. Магнитные явления и наличие у Земли магнитного поля были известны человечеству еще в глубокой древности. Так же давно эти явления использовались людьми для практической деятельности (например, применение компаса). Со второй половины XIX в. измерение напряженности магнитного поля проводилось для поисков магнитных руд. Од-

нако до сих пор природа как геомагнитного, так и гравитационного поля не выяснена.

Основными параметрами геомагнитного поля являются полный вектор напряженности и его составляющие по осям координат. Значения параметров магнитного поля Земли зависят, с одной стороны, от намагниченности всей Земли как космического тела (нормальное поле), а с другой стороны, разной интенсивности намагничивания геологических формаций, обусловленной различием магнитных свойств пород и напряженности магнитного поля Земли как в настоящее время, так и в прошедшие геологические эпохи (аномальное поле). От других методов разведочной геофизики магниторазведка отличается наибольшей производительностью (особенно аэромагниторазведка).

Магниторазведка является наиболее эффективным методом поисков и разведки железорудных месторождений. Она широко применяется и при геологическом картировании, структурных исследованиях, поисках полезных ископаемых, изучении геологической среды. Магнитные методы применяются не только для разведки, но и для глобальных исследований геомагнетизма и палеомагнетизма. Глубинность магниторазведки не превышает 50 км.

### **6.10.1. Основы теории геомагнитного поля и магниторазведки**

#### **Магнитное поле Земли и его изменения на земной поверхности и во времени. Главные элементы магнитного поля**

В любой точке земной поверхности существует магнитное поле, которое определяется полным вектором напряженности. Вдоль вектора устанавливается подвешенная у центра тяжести магнитная стрелка. Проекция этого вектора на горизонтальную поверхность и вертикальное направление, а также углы, составленные этим вектором с координатными осями, носят название главных элементов магнитного поля (рис. 6.10.1).

Если ось  $x$  прямоугольной системы координат направить на географический север, ось  $y$  — на восток, а ось  $z$  — по отвесу вниз, то проекция полного вектора на ось  $z$  называется вертикальной составляющей и обозначается  $Z$ . Проекция полного вектора на горизонтальную плоскость называется горизонтальной составляющей  $H$ . Направление совпадает с магнитным меридианом. Проекция на ось  $x$  называется северной (или южной) составляющей; проекция на ось  $y$  называется восточной (западной) составляющей. Угол между осью  $x$  и составляющей называется склонением и обозначается  $J$ . Принято считать восточное склонение положительным, западное — отрицательным. Угол между вектором и горизонтальной плоскостью называется наклонением и обозначается  $T$ . При наклоне вниз северного конца стрелки наклонение называется северным (или положительным), при наклоне южного конца стрелки — южным (или отрицательным). Взаимосвязь полученных элементов магнитного поля Земли выражается с помощью формул:

$$H = T \cos J, \quad Z = T \sin J, \quad Z = T \sin J, \quad T^2 = H^2 + Z^2 \quad (2.1)$$

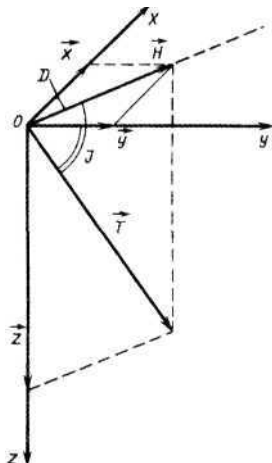


Рис. 6.10.1. Элементы земного магнитного поля

Семь элементов земного магнитного поля можно выразить через любые три составляющие. При магнитной разведке измеряют лишь одну-две составляющие поля (как правило,  $H$  и  $I$ , или  $D$  и  $I$ ).

Распределение значений элементов магнитного поля на земной поверхности обычно изображается в виде карт изолиний, т.е. линий, соединяющих точки с равными значениями того или иного параметра. Изолинии склонения называются изогонами, изолинии наклонения — изоклинами, изолинии или — соответственно изодинамами или. Карты строят на 1 июля и называют их картами эпохи такого-то года. Например, на рис. 6.10.2 приведена карта эпохи 1980 г.

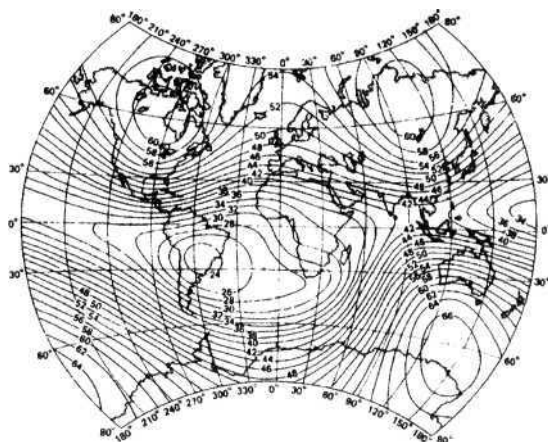


Рис. 6.10.2. Полная напряженность магнитного поля Земли для эпохи 1980 г. Изолинии  $T$  проведены через 4 мкТл (из книги П.Шарма "Геофизические методы в региональной геологии")

## Единицы измерений

Единицей напряженности геомагнитного поля ( $H$ ) в системе Си является ампер на метр (А/м). В магниторазведке применялась и другая единица Эрстед ( $\mathcal{E}$ ) или гамма  $\gamma$ , равная  $10^{-5}$   $\mathcal{E}$  ( $1 \text{ А/м} = 4\pi \cdot 10^{-3}$   $\mathcal{E}$ ). Однако практически измеряемым параметром магнитного поля является магнитная индукция (или плотность магнитного потока)  $B = \mu H$ , где  $\mu$  - магнитная проницаемость среды. Единицей магнитной индукции в системе Си является тесла (Тл). В магниторазведке используется более мелкая единица нанотесла (нТл), равная  $10^{-9}$  Тл. Так как для большинства сред, в которых изучается магнитное поле (воздух, вода, громадное большинство немагнитных осадочных пород).  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  Гн/м = const, то количественно магнитное поле Земли можно измерять либо в единицах магнитной индукции (в нТл), либо в соответствующей ей напряженности поля — гамма  $\gamma$ .

## О происхождении магнитного поля Земли

Происхождение магнитного поля Земли пытаются объяснить различными причинами, связанными с внутренним строением Земли. Наиболее достоверной и приемлемой гипотезой, объясняющей магнетизм Земли, является гипотеза вихревых токов в ядре. Эта гипотеза основана на том установленном геофизическом факте, что на глубине 2900 км под мантией (оболочкой) Земли находится "жидкое" ядро с высокой электрической проводимостью. Благодаря так называемому гиромангнитному эффекту и вращению Земли во время ее образования могло возникнуть очень слабое магнитное поле. Наличие свободных электронов в ядре и вращение Земли в таком слабом магнитном поле привело к индуцированию в ядре вихревых токов. Эти токи, в свою очередь, создают (регенерируют) магнитное поле, как это происходит в динамомашинах. Увеличение магнитного поля Земли должно привести к новому увеличению вихревых потоков в ядре, а последнее — к увеличению магнитного поля и т.д. Процесс подобной регенерации длится до тех пор, пока рассеивание энергии вследствие вязкости ядра и его электрического сопротивления не скомпенсируется добавочной энергией вихревых токов и другими причинами.

## Нормальное геомагнитное поле

В первом приближении магнитное поле Земли может быть уподоблено полю однородно намагниченного шара, или полю диполя ( $G_0$ ), расположенного в области центра Земли. Ось такого диполя по отношению к оси вращения Земли составляет  $11,5^\circ$ . Места выхода продолжений оси этого диполя на земную поверхность называют геомагнитными полюсами. Принято считать магнитный полюс, близкий к северному географическому полюсу (между



ними около 1400 км), южным (отрицательным) геомагнитным. Наоборот, магнитный полюс, находящийся в Антарктиде, -- северным (положительным) геомагнитным полюсом. На полюсах вертикальные составляющие магнитной индукции примерно равны  $\pm 60$  мкТл, а горизонтальные — нулю. На экваторе горизонтальная составляющая приблизительно равна 30 мкТл, а вертикальная — нулю.

Как видно из карты (рис. 6.10.2), геомагнитное поле Земли заметно отличается от поля диполя, образуя по крайней мере 4 (две в северном, одну в южном, одну в Африке) мощные геомагнитные аномалии. Их называют материковыми, или континентальными ( $T_m$ ), а происхождение связывают с наличием дополнительных магнитных диполей на верхней (~3000 км) и нижней (~5000 км) границах "жидкого" ядра. На территории России находится положительная часть Восточно-Азиатской аномалии.

Нормальным (или главным) геомагнитным полем ( $T_n$ ) принято считать поле однородно намагниченного шара ( $T_0$ ) и дополнительных диполей в ядре, обуславливающих материковые аномалии ( $T_m$ ), т.е.  $T_n = T_0 + T_m$ . Карта эпохи какого-то года является Международным эталонным геомагнитным полем или нормальным магнитным полем.

Карты принято строить через 5 лет. Они несколько изменяются за эти годы, что объясняется как вариациями поля во времени, так и появлением новых данных глобальных магнитных съемок (космических, воздушных, наземных, аквальных).

Аномальные геомагнитные поля

Отклонения наблюдаемых значений магнитных векторов ( $G$ ) от нормального поля будут составлять аномалии региональные ( $T_p$ ) или локальные ( $T_l$ ) в зависимости от площади, на которых они получены. Аномальная часть постоянного магнитного поля Земли несет в себе информацию о геологическом строении верхних слоев земной коры.

Региональные аномалии — например, Курская — простираются на больших территориях и связаны с наличием крупных структур, сложенных породами и железными рудами с высокими магнитными свойствами. Находясь в магнитном поле Земли, они намагнитились и создали добавочное аномальное поле, превышающее нормальное поле в отдельных местах в 2 — 4 раза.

Локальные аномалии обусловлены разной намагниченностью геологических структур или залежей руд. Региональные и локальные аномалии бывают положительными и отрицательными. За положительные принято считать те, для которых и совпадают с соответствующей составляющей нормального поля, а отрицательные — те, для которых  $T_a$  и  $Z_a$  они противоположны по направлению. В северном полушарии и на территории России преобладают положительные аномалии.

Таким образом, полное постоянное магнитное поле Земли ( $T$ ) складывается из нормального и аномального полей:

$$T = T_0 + T_m + T_p + T_l + T_n + T_a \quad (2.2)$$

## Вариации земного магнетизма

Наблюдения магнитного поля Земли в течение длительного времени и палеомагнитные исследования показывают, что напряженность магнитного поля и его элементы меняются во времени. Эти изменения получили название вариаций. Принято различать четыре вида магнитных вариаций: вековые, годовые, суточные и магнитные возмущения (бури).

Вековые вариации магнитного поля происходят в течение длительных периодов времени в десятки и сотни лет и приводят к значительным изменениям среднегодовых элементов земного магнетизма. Под изменением того или иного элемента магнитного поля (вековой ход) понимают разности значений этих элементов в разные эпохи, деленные на число лет между эпохами. Вековой ход рассчитывается по обобщенным данным глобальных магнитных съемок за прошедшие 5 лет. Выявлен ряд периодов изменения поля в 500 — 2000 — 5000 лет и более. Вековые вариации различны в разных регионах. Имеется несколько зон (фокусов), в которых изменения поля максимальны. Эти фокусы перемещаются по земной поверхности. Например, за 1942 г. в Индонезии вариации  $Z$  достигли  $\pm 130$  нТл, а на юге Каспийского моря  $+110$  нТл. Возникновения вековых вариаций, видимо, объясняются процессами, протекающими внутри Земли (в ядре и на границе ядра с мантией).

На постоянное поле Земли накладывается переменное магнитное поле или вариации (годовые, суточные, магнитные бури), вызванные внешними процессами, происходящими в ионосфере. Годовые вариации — это изменения среднемесячных значений напряженности магнитного поля. Они характеризуются небольшой амплитудой (десятки нТл).

Суточные вариации связаны с солнечносуточными и лунносуточными изменениями напряженности геомагнитного поля из-за изменения солнечной активности. Максимумы вариации достигают днем и при противостоянии Луны. Годовые и суточные вариации являются плавными, периодическими, невозмущенными вариациями. Их интенсивность возрастает от экватора к полюсам, достигая 200 нТл.

Кроме невозмущенных вариаций, существуют возмущенные вариации, к которым относятся непериодические импульсные вариации и магнитные бури. Магнитные бури бывают разной интенсивности — до 1000 нТл и более, чаще в северных и южных широтах. Они возникают спорадически и проходят по всей земной поверхности либо одновременно, либо с запаздыванием на несколько часов. Продолжительность магнитных бурь колеблется от нескольких часов до нескольких суток. Намечается четкая связь между интенсивностью магнитных бурь и солнечной активностью. В годы максимумов солнечной активности, период которых около 11 лет, наблюдается наибольшее число бурь. Магнитные бури зависят от возмущений в ионосфере, которые, в свою очередь, связаны со вспышками на Солнце и приходом на Землю корпускулярных потоков. Магнитным бурям сопутствуют полярные сияния, ухудшение

радиосвязи, возникновения магнитотеллурических полей (см. 7.1). При магнитотразведке необходимо учитывать и исключать вариации магнитного поля.

Таким образом, в более общем виде полный вектор напряженности переманного поля Земли и аномалии можно представить в виде:

$$T_{\sim} = T_n + T_p + T_l + T_{вар}, \quad Ta = T_p + T_l = T_{\sim} - T_n - T_{вар} \quad (2.3)$$

## Намагниченность горных пород и их магнитные свойства

Региональные и локальные магнитные аномалии зависят от интенсивности намагничения пород  $J$  как современным (индуцированная намагниченность  $J_i$ ), так и древним (остаточная намагниченность  $J_r$ ) магнитными полями, т.е. это векторная сумма  $J = J_i + J_r$ . Индуцированная намагниченность любого образца породы равна  $J_i = kT$ , где  $k$  (каппа) — его магнитная восприимчивость, а  $T$  — полный вектор постоянного геомагнитного поля. Однако этот же образец несет в себе информацию о той намагниченности, которая существовала в момент образования породы и сложным образом менялась до настоящего времени. Ее называют остаточной ( $J_r$ ). Вместе с отношением  $Q = J_r / J_i$  остаточная намагниченность количественно характеризует свойство породы сохранять или менять намагниченность за весь свой возраст, может быть, составляющий многие миллионы лет.

Примером материалов и руд, обладающих сильным магнитным полем даже при экранировке от земного магнитного поля, являются искусственные магниты или естественные образцы магнетита, у которых намагниченность устойчива за счет остаточной.

### Магнитная восприимчивость горных пород и руд

Способность материалов и горных пород намагничиваться характеризуется магнитной восприимчивостью ( $k$ ) — основным магнитным свойством горных пород.

В системе Си это безразмерная величина. Практически ее измеряют в  $10^{-5}$  ед. Си. У разных горных пород она меняется от 0 до 10 ед. Си. По магнитным свойствам минералы и горные породы делятся на три группы: диамагнитные, парамагнитные и ферромагнитные. У диамагнитных пород магнитная восприимчивость очень мала (менее  $10^{-5}$  ед. Си) и отрицательна, их намагничение направлено против намагничивающего поля. К диамагнитным относятся многие минералы и горные породы, например, кварц, каменная соль, мрамор, нефть, лед, графит, золото, серебро, свинец, медь и др.

У парамагнитных пород магнитная восприимчивость положительна и также невелика. К парамагнитным относится большинство минералов, осадочных, метаморфических и изверженных пород.

Особенно большими (до нескольких миллионов  $10^{-5}$  ед. Си) обладают ферромагнитные минералы, к которым относятся магнетит, титаномангнетит, ильменит, пирротин.

Таблица 6.10.1

| Минерал, горная порода         | к $10^{-5}$ (ед. Си)          |                |
|--------------------------------|-------------------------------|----------------|
|                                | диапазон измерений            | среднее        |
| Кварц                          | -                             | 10             |
| Кальцит                        | 7 - 12                        | -              |
| Гипс                           | -                             | 12             |
| Уголь                          | -                             | 25             |
| Сфалерит                       | -                             | 750            |
| Гематит                        | 500 - 50000                   | 6000           |
| Пирротин                       | $10^3 - 10^7$                 | 150000         |
| Ильменит                       | $5 \cdot 10^5 - 5 \cdot 10^6$ | $10^6$         |
| Магнетит                       | $10^6 - 10^7$                 | $5 \cdot 10^6$ |
| Известняк                      | 25 - 3500                     | 300            |
| Песчаник                       | 0 - 20000                     | 400            |
| Гнейс                          | 100 - 20000                   | -              |
| Гранит                         | 0 - 40000                     | 2000           |
| Диабаз                         | 1000 - 15000                  | 5000           |
| Габбро                         | 1000 - 100000                 | 60000          |
| Базальт                        | 30 - 150000                   | 60000          |
| Перидотит                      | 90000 - 200000                | 150000         |
| Осадочные (среднее)            | 0 - 5000                      | 1000           |
| Метаморфические (среднее)      | 0 - 75000                     | 50000          |
| Кислые изверженные (среднее)   | 50 - 80000                    | 8000           |
| Основные изверженные (среднее) | 60 - 120000                   | 30000          |

Магнитная восприимчивость большинства горных пород определяется прежде всего присутствием и процентным содержанием ферромагнитных минералов.

В таблице 2.1 приведены значения некоторых породообразующих минералов и пород. Из таблицы видно, что сильно магнитными являются ферромагнитные минералы. Среди изверженных пород наибольшей магнитной восприимчивостью обладают ультраосновные и основные породы, слабо магнитны и магнитны кислые породы. У метаморфических пород магнитная восприимчивость ниже, чем у изверженных. Осадочные породы, за исключением некоторых песчаников и глин, практически немагнитны.

Магнитная восприимчивость пара- и ферромагнетиков уменьшается с повышением температуры и практически исчезает при температуре Кюри, которая у разных минералов меняется от +400 до +700°C. Максимальная глубинность магниторазведки примерно составляет 25-50 км. На больших глубинах температуры недр превышают точку Кюри, и все залегающие здесь породы становятся практически одинаково немагнитными.

Магнитная восприимчивость в горной породе не всегда одинакова по всем направлениям, или изотропна. Она может меняться по разным направлениям, увеличиваясь в плоскости напластования осадочных и сланцеватых метаморфических пород, уменьшаясь в перпендикулярном направлении. Различия могут достигать 20%.

Разведываемые геологические структуры и руды с магнитной восприимчивостью  $k$  залегают среди вмещающих пород с восприимчивостью  $k_0$ . Поэтому, как и в гравиразведке, представляет интерес избыточная, или эффективная, магнитная восприимчивость  $\Delta k = k - k_0$ . Величины могут быть и положительными, и отрицательными, разными по величине. Благодаря отличию  $\Delta k$  от нуля и возникают магнитные аномалии.

Магнитную восприимчивость измеряют как на образцах горных пород, так и в естественном залегании. С помощью так называемых астатических магнитометров измеряются магнитные свойства образцов произвольной формы. Число образцов одной породы должно составлять несколько десятков, чтобы результаты были статистически обоснованы. Для изучения в естественных условиях залегания пород применяются разного рода каппаметры.

## **Остаточная намагниченность пород и руд**

При остывании расплавленных минералов и горных пород и переходе их температуры через точку Кюри они намагничиваются окружающим магнитным полем, приобретая начальную остаточную намагниченность ( $J_r$ ). Если напряженность магнитного поля начнет возрастать, то  $J_r$  также растет до некоторого предела. При уменьшении магнитного поля она уменьшается до некоторой остаточной намагниченности. Чтобы ее уничтожить, нужно приложить поле противоположного знака, называемого коэрцитивной силой. Она является мерой жесткости остаточной намагниченности. В истории Земли были многократные изменения не только интенсивности, но и знака магнитного поля. Поэтому существующая в настоящее время величина  $J_r$  отражает

сложную магнитную жизнь породы и, может быть, неоднократную ее перенамагниченность.

Значения  $J_r$  очень большие ( $Q=J_r/J_i$  достигает 100) у быстро охлаждавшихся излившихся изверженных пород типа базальтов. В породах, подвергшихся термальному метаморфизму,  $Q$  может достигать 10. Величина  $Q$  остальных пород обычно не превышает 0,1. Основным фактором, увеличивающим  $J_r$  пород, является наличие в них хотя бы малых концентраций ферромагнетиков.

У изверженных пород остаточная намагниченность возникает в ходе их охлаждения (перехода через точку Кюри), т.е. имеет кристаллизационную (химическую) природу. У осадочных пород она седиментационная. В ходе осаждения в водоемах твердые частицы намагничивались и сохранили в консолидированных осадочных породах эту относительно стабильную ориентированную остаточную намагниченность.

При интенсивной остаточной намагниченности  $J_r > J_i$  пород они могут создавать аномалии другого знака, например, отрицательного среди обычно положительных, если знаки древнего и современного поля противоположны.

Остаточную намагниченность измеряют на образцах горных пород кубической или цилиндрической формы с размером 2-5 см, строго ориентированных в пространстве. Для этого, выбирая образец, его "привязывают" к горизонту, т.е. ставят на нем метки ( $x, y$ ) по компасу и ( $z$ ) — по отвесу. Для измерения  $J_r$  используются астатические или так называемые сверхпроводящие СКВИД-магнитометры.

Методика измерений  $J_r$  основана на представлении о том, что каждый образец является магнитным. Поэтому, измеряя три магнитные составляющие поля такого магнита ( $H_x, H_y, H_z$ ) на нескольких расстояниях  $r$  от его центра, можно получить избыточную систему уравнений для расчета  $J=kT+J_r$  (за  $T$  принимается среднее магнитное поле района расположения лаборатории). С помощью специальных приемов проводится определение первичной намагниченности во время образования породы и исключения вторичных перемagnetиваний за время ее жизни. Число образцов должно составлять десятки для каждого стратиграфического комплекса пород для дальнейшей статистической обработки. Далее по ним определяются усредненные значения склонения ( $D_{др}$ ) и наклонения ( $J_{др}$ ) древнего магнитного поля (см. рис. 6.10.1), позволяющие оценить положение геомагнитного полюса во время образования породы в современной системе географических координат.

Третьим магнитным параметром горных пород является магнитная проницаемость  $\mu = 1+4\pi k$ , которая практически у всех горных пород равна магнитной проницаемости вакуума ( $\mu = \mu_0$  так как  $k < 10^{-5}$  ед.Си). Лишь у ферромагнитных руд  $\mu$  может достигать нескольких единиц.

## **Принципы решения прямых и обратных задач магниторазведки Основные положения теории магниторазведки**

При магниторазведке рассчитываются аномалии полного вектора  $T_a$  (4.1.1) или его составляющих ( $Z_a$ ,  $H_a$ ) путем исключения из наблюдаемого поля нормального поля и вариаций. Поэтому в теории магниторазведки определяются эти параметры для объектов с разной интенсивностью и направлением намагничения ( $J$ ). Для простоты решения можно считать  $J \sim kT_{cp}$ , где  $k$  — магнитная восприимчивость объекта,  $T_{cp}$  — средняя напряженность геомагнитного поля в месте его расположения, а остаточной намагниченностью ( $J_r$ ) пренебречь.

Основной закон магнетизма был сформулирован Кулоном, который предполагал, что существование магнетизма связано с наличием магнитных масс, положительных и отрицательных. Между двумя магнитными массами  $m_1$  и  $m_2$ , помещенными в среду с магнитной проницаемостью  $\mu = 1 + 4\pi k$ , действует сила  $F$ , которая определяется законом Кулона  $F = m_1 m_2 / \mu r^2$ , где  $r$  — расстояние между центрами магнитных масс.

Последующим развитием физики было доказано, что магнитных масс, как самостоятельных субстанций, в природе не существует, а магнитные свойства тел являются следствием движения электрически заряженных частиц в атомах вещества. Одни вещества способны под действием магнитного поля упорядочивать движения зарядов и намагничиваться, другие нет. Хотя магнитных масс в природе нет, но в теории магнетизма законом Кулона формально продолжают пользоваться. При этом под магнитной массой одного знака понимается произведение интенсивности намагничения ( $J$ ) на площадь намагниченного тела ( $S$ ), перпендикулярную этому вектору ( $m = JS$ ).

Любое намагниченное тело можно представить сочетанием двух таких магнитных масс, находящихся на противоположных частях тела — полюсах. Северным (положительным) полюсом намагниченного тела (например, магнитной стрелки) считается тот, который поворачивается в сторону северного географического полюса, если дать возможность телу свободно вращаться вокруг вертикальной оси. Как отмечалось выше, при таком определении магнитный полюс Земли, находящийся в северном полушарии, обладает южным (отрицательным) магнетизмом, поскольку притягиваются магнитные массы противоположного знака, а массы одного и того же знака отталкиваются.

В теории магниторазведки, как и в любых других методах геофизики, решаются прямые и обратные задачи. Прямой задачей магниторазведки называется нахождение магнитных аномалий ( $T_a$ ,  $Z_a$  и др.) над объектами известной формы, глубины залегания и намагниченности. Обратной задачей магниторазведки является определение формы, глубины залегания, намагниченности по измеренному площадному распределению аномалий.

### **Поле магнитного диполя**

Для облегчения решения задач магниторазведки вводится понятие магнитного потенциала точечной магнитной массы

$$U = \frac{m}{\mu r}, \quad (2.4)$$

где  $r$  — расстояние от центра магнитной массы до точки наблюдения.

В теории магнетизма пользуются понятием магнитного диполя, т.е. двух равных, близко расположенных магнитных масс противоположного знака (рис. 6.10.3). Потенциал диполя  $dU$  выражается формулой

$$dU = \frac{m}{\mu} \left( \frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right),$$

где  $r_1$  и  $r_2$  — расстояния от центра магнитных масс до точки наблюдения.

Выразив с помощью теоремы косинусов  $r_1$  и  $r_2$ , через  $r$ ,  $dl$  и  $\theta$  можно записать

$$dU = \frac{m}{\mu} \left[ \frac{1}{\sqrt{r^2 + \left(\frac{dl}{r}\right)^2 - rdl\cos\theta}} - \frac{1}{\sqrt{r^2 + \left(\frac{dl}{r}\right)^2 + rdl\cos\theta}} \right].$$

Разделив числитель и знаменатель на  $r$  и используя формулу бинома Ньютона, получим

$$dU = \frac{m}{\mu r} \left[ \left(1 - \frac{dl}{r} \cos\theta\right)^{1/2} - \left(1 + \frac{dl}{r} \cos\theta\right)^{1/2} \right] = \frac{m}{\mu r} \left[ \left(1 + \frac{dl}{r} \cos\theta + \dots\right) - \left(1 - \frac{dl}{r} \cos\theta + \dots\right) \right].$$

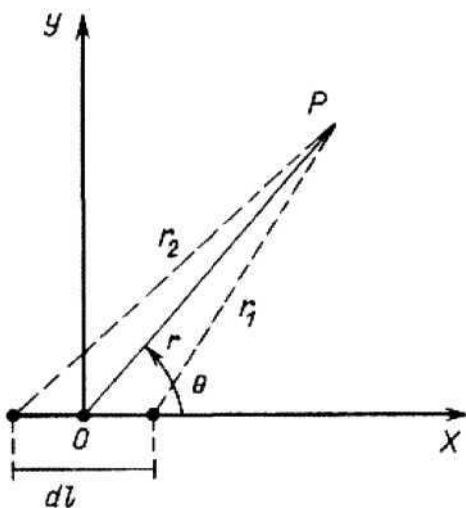


Рис. 6.10.3. Магнитный диполь



Поскольку  $(dl/r) \ll 1$ , то всеми степенями выражения  $dl/r$ , большими единицы, можно пренебречь, и формула потенциала диполя упростится:

$$dU = \frac{mdl \cos \theta}{\mu r^2}$$

Или, заменив  $dM = mdl$  получим окончательное выражение для потенциала диполя

$$dU = \frac{dM \cos \theta}{\mu r^2}$$

Из выражения для потенциала диполя нетрудно получить составляющие поля  $H_x$  и  $H_y$  и полный ( $H$ ) вектор напряженности. Заменив  $\cos \theta = x/r$  можно записать:

$$dU = \frac{dM \cos \theta}{\mu r^2} = \frac{dM x}{\mu (x^2 + y^2)^{3/2}} ;$$

$$H_x = -\frac{\partial(dU)}{\partial x} = -dM \frac{(x^2 + y^2)^{3/2} - x \frac{3}{2}(x^2 + y^2)^{1/2} 2x}{\mu (x^2 + y^2)^3} = \frac{dM}{\mu} \frac{2x^2 - y^2}{(x^2 + y^2)^{5/2}} ;$$

$$H_y = -\frac{\partial(dU)}{\partial y} = -dM \frac{-x \frac{3}{2}(x^2 + y^2)^{1/2} 2y}{\mu (x^2 + y^2)^3} = \frac{dM}{\mu} \frac{3xy}{(x^2 + y^2)^{5/2}} ;$$

$$H = \sqrt{H_x^2 + H_y^2} = \frac{dM}{\mu r^3} \sqrt{1 + 3 \cos^2 \theta} . \quad (2.5)$$

В частности, на протяжении оси диполя ( $\theta=0$ )  $H_0 = 2dM / \mu r^3$  на перпендикуляре к оси диполя, в его центре ( $\theta=90$ )  $H_{90} = dM / \mu r^3$ .

Реальные магнитные тела можно рассматривать как совокупность элементарных магнитных диполей.

Интенсивность намагничивания элементарного объема ( $J$ ), согласно определению, равна отношению магнитного момента ( $dM$ ) к его объему ( $dV$ ). Поэтому

выражение для потенциала магнитного диполя переписывается в следующем виде:  $dU = \frac{J \cos \theta}{\mu} r^2 dV$ , где вектор  $J$  направлен вдоль оси диполя.

Магнитный потенциал любого тела можно представить в виде интеграла по объему этого тела от потенциалов элементарных диполей, из которых состоит данное тело:

$$U = \iiint_V \frac{J \cos \theta dV}{\mu r^2}, \quad T_a = \iiint_V \frac{J \sqrt{1 + 3 \cos^2 \theta}}{\mu r^2} dV \quad (2.6)$$

где интегрирование ведут по всему объему тела ( $V$ ).

Эти уравнения лежат в основе всей теории магниторазведки. Аналитические выражения при решении уравнений (2.6) получаются лишь для тел простой геометрической формы и однородной (постоянной) намагниченности. Для тел более сложной формы, да еще при разной намагниченности, возможны численные решения с помощью ЭВМ. Рассмотрим решение прямых и обратных задач для некоторых простейших тел: вертикального бесконечного столба (стержня), шара, пласта и горизонтального цилиндра бесконечного простираения для случая их вертикальной намагниченности. Допущение вертикальной намагниченности не только упрощает решение задач, но и является вполне обоснованным, поскольку намагниченность горных пород при широте, большей 40–45°, близка к вертикальной. Кроме того, при расчетах можно считать, что  $\mu = \mu_0$ , где  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  – магнитная проницаемость воздуха.

### **Прямая и обратная задачи над намагниченным вертикальным бесконечно длинным столбом (стержнем)**

1. *Прямая задача.* Пусть на глубине  $h$  залегает вершина бесконечно длинного столба (вертикального цилиндра или стержня) сечением  $s$  (рис. 6.10.4). Его можно представить как тело одного полюса ( $m$ ) с интенсивностью намагничивания ( $J$ ), направленной вдоль оси  $z$ , и "магнитной массой"  $m = Js$ . Так как нижний полюс столба расположен очень далеко, то его влиянием можно пренебречь и считать, что вся "масса" сосредоточена на вершине столба.

Необходимо найти напряженность поля вдоль профиля  $x$  над телом. Потенциал от верхнего полюса столба в точке  $P$  будет равен потенциалу точечной массы:

$$U = \frac{m}{\mu r} = \frac{m}{\mu \sqrt{x^2 + h^2}} \quad (2.7)$$

Составляющие поля выражаются производными потенциала по соответствующим осям координат:

$$Z_a = -\frac{\partial U}{\partial h} = \frac{J_{sh}}{\mu(x^2 + h^2)^{3/2}}, \quad H_a = -\frac{\partial U}{\partial x} = \frac{J_{sx}}{\mu(x^2 + h^2)^{3/2}}, \quad (2.8)$$

$$T_a = \sqrt{Z_a^2 + H_a^2} = \frac{J_s}{\mu(x^2 + h^2)^{5/2}}.$$

Используя полученные формулы, можно построить графики напряженности поля (рис. 6.10.4). Легко видеть, что над столбом будут максимумы  $T_a$  и  $Z_a$ , а значения их будут одного знака, положительные при вертикальной  $J_a$ . Горизонтальная составляющая ( $H$ ) слева будет иметь максимум, а справа - минимум. Вдалеке от столба аномалии исчезают. В плане над таким столбом изолинии  $T_a$  и  $Z_a$  будут иметь вид концентрических окружностей одного знака.

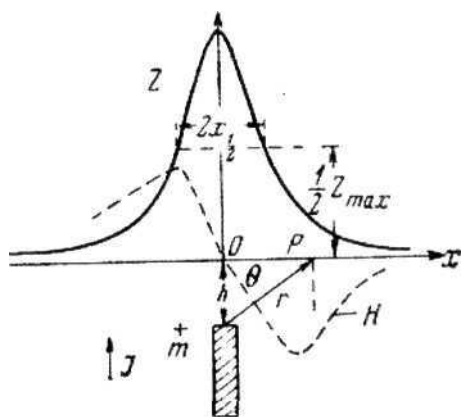


Рис. 6.10.4. Магнитное поле вертикального бесконечно длинного столба

2. *Обратная задача.* Решение уравнений (2.8) дает возможность по характерным точкам на графиках определить глубину залегания верхней кромки вертикального бесконечно длинного столба ( $h$ ). Так центр столба находится в точке, где  $x=0$ , а  $Z_{\max} = T_{\max} = J_s/mh^2$

Для точек, удаленных на расстояния  $x_z/2$  от начала координат, в которых равно половине максимального

$$\frac{Z_{1/2} J_{sh}}{2h^2 \mu} = \frac{J_{sh}}{\mu(x^2 + h^2)^{3/2}}$$

Решив это уравнение, получим  $x_z/2 = 0,7 h$ . Аналогичным образом находят связи и между другими характерными точками  $x_{T1/2}$ ,  $x_{H0}$  (экстремумы на составляющей  $H$ ),  $x_{ZH}$  (абсциссы точек пересечения  $Z$  и  $H$ ). В результате

получаются следующие формулы для расчета  $h$  по абсолютным значениям этих параметров:

$$h = 1,4|X_{\mu z}| = 1,3|X_{z1/2}| = |X_{T1/2}| = |X_{zH}|. \quad (2.9)$$

Зная  $h$ , можно оценить величину магнитной массы:

$$m = J_8 = Z_{\max} \cdot \mu h^2 = T_{\max} \mu h^2 = 3,67 H_{\max} \cdot \mu h^2$$

Так как  $J \sim T_{\phi} k$ , где  $T_{\phi}$  — среднее значение полного вектора напряженности поля в изучаемом районе, а  $k$  — магнитная восприимчивость столба, то  $ks = m/T_{\phi}$

Отсюда, если известно  $\backslash$ карра по измерениям на образцах, можно определить площадь поперечного сечения столба ( $s$ ).

### **Прямая и обратная задачи над вертикально намагниченным шаром.**

1. *Прямая задача.* Пусть вертикально намагниченный шар с центром на глубине залегает под началом координат (рис. 6.10.5). Необходимо определить напряженность поля вдоль профиля  $x$ . Потенциал шара можно представить как потенциал диполя, помещенного в его центре. Поэтому, согласно (2.7), потенциал шара с магнитным моментом  $M = JV$  (или магнитной массой  $m = M$ ), равен:

$$U = \frac{M \cos \theta}{\mu r^2} = \frac{MH}{\mu r^3} = \frac{JVH}{\mu (x^2 + H^2)^{3/2}} \quad (2.10)$$

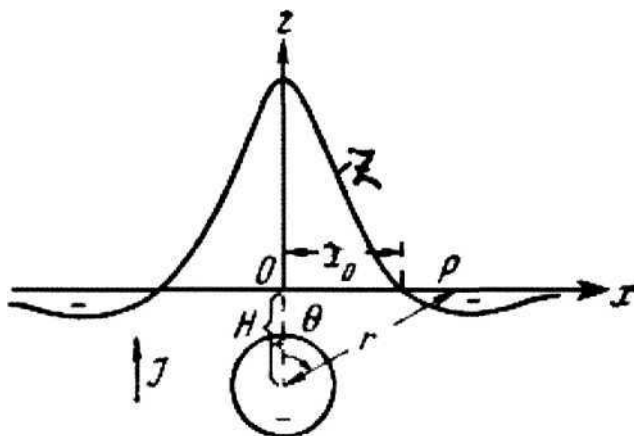


Рис. 6.10.5. Магнитное поле шара

Отсюда, взяв производные, найдем элементы магнитного поля шара:

$$\begin{aligned} Z_a &= -\frac{\partial U}{\partial H} = \frac{JV(2H^2 - x^2)}{\mu(x^2 + H^2)^{5/2}}, H_a = -\frac{\partial U}{\partial x} = \frac{3JVHx}{\mu(x^2 + H^2)^{5/2}}, \\ T_a &= \sqrt{Z^2 + H^2} = \frac{JV\sqrt{4H^2 + x^2}}{\mu(x^2 + H^2)^{5/2}} \end{aligned} \quad (2.11)$$

Анализ этих формул и построенных по ним графиков показывает, что над центром шара ( $x = 0$ ) будут  $Z_{max} = T_{max} = 2JV/mH^3$ , а  $H = 0$ . При  $x \rightarrow \pm \infty$  аномалии исчезают. При  $x = \pm \sqrt{2HZ_a} < 0$ , при  $x < \sqrt{2HZ_a} > 0$ , а при  $x > \sqrt{2HZ_a} < 0$ .

Таким образом, в плане над шаром изолинии  $Z_a$  и  $T_a$  будут иметь вид концентрических окружностей. При этом изолинии  $Z_a$  будут двух знаков, а  $T_a$  — одного.

2. *Обратная задача.* Решение уравнений (2.11) теми же приемами, что и для столба, дает возможность по характерным точкам на графиках найти глубину центра вертикально намагниченного шара:

$$Ha = 1,8|xZ_{1/2}| = 1,8|xZH| = 1,5|xT_{1/2}| = 0,7|xZ_0| = 0,5|xZ_{min}| = \quad (2.12)$$

где  $x_{1/2}$  и  $x_{T1/2}$  — абсциссы точек половины  $Z_a, T_a$ ,  $x_{Z0}$  — точки с  $Z_a = 0$ ; *in*, точки с  $Z_a = Z_{min}$

Зная  $H$ , можно оценить магнитную массу шара ( $m$ ):

$$m = JV = Z_{max}\mu h^{3/2} = T_{max}\mu h^{3/2}$$

Отсюда, так как  $J \sim \kappa T_{CP}$ , то  $kV \sim m/T_{CP}$ . Если известны  $T_{CP}$  и  $\kappa$  можно определить объем шара.

**Прямая и обратная задачи над вертикально намагниченным тонким пластом бесконечного простираения и глубины.**

Пусть на глубине  $h$  параллельно оси  $u$  расположен бесконечно длинный вертикальный пласт (с толщиной  $l$ , меньшей глубины залегания), намагниченный вертикально (рис. 6.10.6). Определим для простоты лишь  $Z_a$  вдоль оси  $x$ .

Поскольку нижняя часть пласта расположена глубоко, то влияние магнитного полюса глубоких частей пласта будет мало, и можно считать, что магнитные массы сосредоточены вдоль поверхности в виде линейных полюсов. Магнитная масса единицы длины пласта равна  $dm/du = Jl$ .

Разобьем пласт на множество тонких "столбов". Тогда притяжение пласта будет складываться из притяжения всех элементарных столбов, а вертикальная составляющая его магнитного притяжения будет равна интегралу в пределах

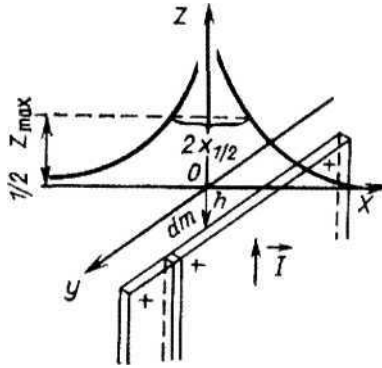


Рис. 6.10.6. Магнитное поле тонкого пласта бесконечного простираения

от  $-\infty$  до  $+\infty$  (по оси  $y$ ) выражения для притяжения элементарного столба. Потенциал элементарного тонкого столба равен

$$dU = dm/\mu R = J l dy / \mu \sqrt{x^2 + y^2 + h^2},$$

а вертикальная составляющая  $dZ_0 = -\partial(dU)/\partial h = J l h dy / \mu \sqrt{x^2 + y^2 + h^2}$ , откуда  $Z$  равно

$$Z_a = \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{J l h dy}{\mu (x^2 + y^2 + h^2)^{3/2}} = \frac{2 J l h}{\mu (x^2 + h^2)} \quad (2.13)$$

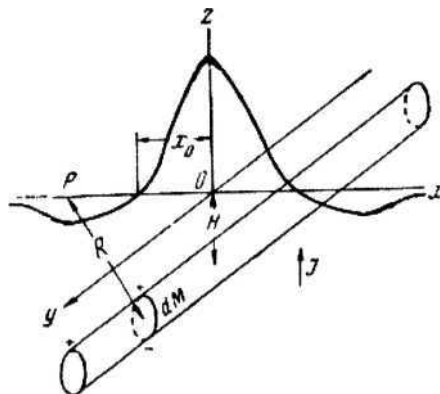


Рис. 6.10.7. Магнитное поле горизонтального цилиндра бесконечного простираения

График  $Z_a$  будет иметь максимум над центром пласта и асимптотически стремиться к нулю при удалении от пласта. В плане над пластом будут вытянутые аномалии  $Z_a$  одного знака. Анализируя формулу (2.13), можно найти связи между глубиной залегания пласта ( $h$ ) и  $x_{1/2}$ , т.е. абсциссой графика, где  $Z_a = Z_{max}/2$ ;  $h = x_{1/2}$ .

Магнитная масса единицы длины равна  $m = J l = Z_{max} \mu h / 2$ . Заменяя  $J \sim k T_{cp}$ , получим  $l_k = m / T_{cp}$ . Зная  $T_{cp}$  и  $k$ , можно рассчитать ширину пласта.

Прямая и обратная задачи для вертикально намагниченного горизонтального цилиндра бесконечного простираения.

Пусть на глубине  $H$  параллельно оси  $y$  расположен бесконечно длинный цилиндр с магнитным моментом единицы длины, равным  $M = J_s$ , где  $J$  - интенсивность намагничивания, постоянная для всего цилиндра и направленная вертикально,  $s$  — поперечное сечение цилиндра (рис. 6.10.7). Требуется определить напряженность поля вдоль оси  $x$ . Поле такого цилиндра можно считать эквивалентным полю бесконечного числа вертикальных магнитных диполей, центры которых расположены по оси цилиндра.

Потенциал в точке от элементарного диполя определяется согласно уравнению (2.5):

$$dU = \frac{dM \cos \theta}{\mu R^2} = \frac{J H dV}{\mu R^2} = \frac{J H ds dy}{\mu R^2}$$

где  $\sqrt{x^2 + y^2 + H^2}$ .

Потенциал всего цилиндра равен потенциалу от системы диполей, расположенных вдоль оси бесконечного цилиндра, или интегралу по объему цилиндра от выражения для потенциала элементарного диполя:

$$U = \frac{JY}{\mu} \iint_s \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{dy}{(x^2 + y^2 + H^2)^{3/2}}$$

Так как  $\iint ds = s$ , а  $\int_{-\infty}^{+\infty} \frac{dy}{(x^2 + y^2 + H^2)^{3/2}} = \frac{2}{x^2 + H^2}$ , то

$$U = 2J_s \frac{H}{\mu(x^2 + H^2)} + \frac{2MH}{\mu(x^2 + H^2)}$$

и

$$Z_a = -\frac{\partial U}{\partial H} = \frac{2M}{\mu} \frac{H^2 - x^2}{(x^2 + H^2)^2} \quad (2.14)$$

Легко видеть, что при  $x=0$  будет максимум  $Z_a$ , а при  $x=\pm HZ_a=0$  При  $|x|>0$  значения  $Z_a$  будут отрицательны, при  $|x|<H$  — положительны.

В плане над горизонтальным цилиндром будут вытянутые аномалии двух знаков.

При решении обратной задачи глубину залегания цилиндра можно определить по формулам:  $H=|x_0|=0,7|x_{min}|$ , где  $x_0$  и  $x_{min}$  — абсциссы точек, в которых  $Z_a=0$  и  $Z_a=Z_{min}$ . Зная  $H$ , можно найти погонную массу цилиндра  $M=Z_{max} \rho H^2 \mu/2$ . Заменив  $J \sim kT_{cp}$ , получим  $k_s=M/T_{cp}$ . Зная  $T_{cp}$  и  $k$ , можно рассчитывать площадь сечения цилиндра.

### **Численные методы решения прямых и обратных задач магниторазведки**

Пользуясь формулой (2.6), можно решать прямые задачи для тел других форм и невертикальной намагниченности. Практически эти расчеты реализуются с помощью ЭВМ. Обратные задачи можно решать методом сравнения наблюдаемых графиков или карт аномальных магнитных полей с теоретически рассчитанными для меняющихся геометрических параметров и магнитных свойств. Получив наименьшие расхождения между ними, теоретические параметры совпавшей модели переносятся на реальные объекты. Они играют роль одного из эквивалентных решений (см. 6.1).

## **6.10.2. Аппаратура и методика магниторазведки**

Принципы измерений параметров геомагнитного поля и аппаратура для магниторазведки. Измеряемые параметры геомагнитного поля

Измерения магнитного поля Земли и его вариаций проводят как на стационарных пунктах — магнитных обсерваториях, которых насчитывается на Земле около 150, так и при магниторазведочных работах. Абсолютные определения полного вектора напряженности геомагнитного поля сводятся к измерению, как правило, трех его элементов (например,  $Z$ ,  $D$ ,  $H$ ). Для этого применяют сложные трехкомпонентные магнитные приборы, которые называются магнитными теодолитами и вариационными станциями.

При геологической разведке измеряют абсолютные  $Z$ ,  $T$  и относительные (по отношению к какой-нибудь исходной (опорной) точке  $\Delta Z$ ,  $\Delta T$ ) элементы.

Приборы для магнитной разведки (магнитометры) характеризуются разнообразием принципов устройства. В основном используются четыре типа магнитометров — оптико-механические, феррозондовые, протонные и квантовые.

### **Оптико-механические магнитометры**

Чувствительная магнитная система оптико-механических магнитометров состоит из магнита, который может вращаться либо вокруг вертикальной оси (подобно магнитной стрелке в компасе) для измерений приращений горизонтальной составляющей в двух точках ( $\Delta H$ ), либо вокруг горизонтальной оси



для измерения приращений вертикальной составляющей ( $\Delta Z$ ). Углы отклонения  $\Delta\phi$ , пропорциональные  $\Delta H$  или  $\Delta Z$ , определяются с помощью специальной оптической системы. Сняв отсчеты по магнитометру в двух точках ( $n$  и  $n_0$ ), можно определить приращение, например,  $\Delta Z = c(n - n_0)$ , где  $c$  — цена деления магнитометра. Ее определяют путем градуировки с помощью эталонировочных магнитов. На этом принципе был построен магнитометр, названный весами Шмидта, применявшийся в магниторазведке для измерения  $\Delta Z$  свыше 50 лет. Среди отечественных магнитометров к этому типу относились полевые приборы М-2, М-18, М-27, а также приборы для измерения магнитных свойств образцов М-14 и астатические магнитометры. Погрешности в определениях  $\Delta Z$  с помощью таких магнитометров составляют  $\pm(2-5)$  нТл.

### **Феррозондовые магнитометры**

Измерителем поля в феррозондовом магнитометре является феррозонд (или магнитомодулярный датчик), представляющий собой катушку с ферромагнитным сердечником. Первичная обмотка сердечника возбуждается от вспомогательного звукового генератора частотой 200 Гц. Под его воздействием меняется магнитная проницаемость материала сердечника, а это, вследствие законов индукции, приводит к тому, что во вторичной обмотке катушки возникает электродвижущая сила, пропорциональная вектору напряженности магнитного поля Земли, направленному вдоль оси сердечника.

Для измерения вертикальной составляющей феррозонд ориентируется по вертикали особым маятником, помещенным в кардановом подвесе. Последний снабжен демпфирующим устройством для быстрого затухания колебаний. Феррозонд подключается к измерительному блоку. В нем помещен звуковой генератор, переключатель поддиапазонов, переключатель компенсации магнитного поля, измерительный индикаторный прибор. Среди отечественных магнитометров к этому типу относится магнитометр М-17, предназначенный для измерения  $\Delta Z$  с точностью до  $1 \pm 5$  нТл.

На феррозондовом принципе изготавливались отечественные аэромагнитометры — АЭМ-49, АМ-13, АММ-13, АСТ-46, АМФ-21 и др. В аэромагнитометрах измерительный феррозонд с помощью особых карданных устройств и двух дополнительных взаимно перпендикулярных феррозондов устанавливается вдоль полного вектора напряженности магнитного поля Земли. Он помещается в специальной гондole и буксируется за самолетом на кабеле длиной 40-50 м. Электрический сигнал с этого блока по кабелю попадает на пульт магнитометра, установленный на самолете, где усиливается электронным усилителем, выпрямляется и попадает на автоматическое компенсационное устройство и особый самописец. На ленте, кроме напряженности поля  $AT$ , записываются высота полета, марки времени, отметки ориентиров или синхронных аэрофотоснимков. Аэромагнитометры устанавливаются на самолетах легкого типа или на вертолетах. Погрешности измерений  $\Delta T$ -аэромагнитометрами не превышают  $\pm 20$  нТл.

## **Ядерно-прецессионные (протонные) магнитометры**

Чувствительным элементом протонного магнитометра является жидкость, богатая протонами (вода, спирт). Сосуд с этой жидкостью помещается внутри питающей (поляризационной) катушки, в которой с помощью постоянного тока от батарейки создается магнитное поле. Его надо направить перпендикулярно полному вектору магнитного поля Земли в данной точке (7). Жидкость "намагничивается" в течение примерно двух секунд, и все протоны, которые можно считать элементарными магнетиками, устанавливаются вдоль намагничивающего поля. Затем намагничивающее поле быстро выключается. Протоны, стремясь установиться вдоль вектора  $T$ , колеблются (прецессируют) вокруг него и индуцируют в измерительной катушке очень слабую ЭДС, частота которой пропорциональна величине напряженности поля. На этом принципе были изготовлены отечественные магнитометры: полевой (МПП-203) с погрешностью измерений  $T$  до  $\pm 2$  нТл, а также аэромагнитометр (МСС-214) и гидромагнитометр (ММП-3) с погрешностями порядка  $\pm 3$  нТл.

### **Квантовые магнитометры**

В квантовых магнитометрах, предназначенных для измерения абсолютных значений модуля индукции магнитного поля ( $B = \mu_0 T$ ), используют так называемый эффект Зеемана. Атомы, обладающие магнитным моментом, при попадании в магнитное поле приобретают дополнительную энергию, частота излучения которой пропорциональна полному вектору магнитной индукции этого поля в точке наблюдения. Чувствительным элементом магнитометра является сосуд, в котором имеются пары цезия, рубидия или гелия. В результате вспышки монохроматического света (метод оптической накачки) электроны паров переводятся с одного энергетического подуровня на другой. Возвращение их на прежний уровень после окончания накачки сопровождается излучением энергии с частотой, пропорциональной величине магнитного поля. Отечественная промышленность выпускала полевые квантовые магнитометры М-33, ММП-303 для измерения с погрешностью 0,1 -- 1 нТл, а также морской магнитометр КМ-8 и аэромагнитометр КАМ-28.

## **Наземная магнитная съемка**

### **Общая характеристика методики полевой магнитной съемки**

Наземная полевая магнитная съемка проводится с помощью пешеходных магнитометров весом 5 -- 6 кг (см. 5.1). На каждой точке измеряются или абсолютные значения полного вектора геомагнитного поля (7), точнее магнитной индукции ( $B = \mu_0 T$ ), или относительные значения. Под относительными понимаются приращения той или иной составляющей поля в любой точке наблюдения по отношению одного исходного пункта. При снятии отсчетов записывается время ( $t$ ). Полевая съемка отличается высокой производительностью: отряд из двух человек обрабатывает от нескольких десятков до двухсот точек в день.

Методика, т.е. способ проведения магниторазведочных работ, сводится к выбору вида съемок, их масштаба, направления профилей, густоты точек наблюдения, точности измерений и способа изображения результатов.

Различают три вида наземных магнитных съемок: 1) картировочно-поисковые, 2) поисково-разведочные, 3) разведочные (или детальные). Остановимся на краткой характеристике этих видов съемок.

Целью картировочно-поисковых магнитных съемок является решение задач крупномасштабного геологического картирования (масштабы 1 : 50 000, 1 : 25 000, 1:10 000), а также непосредственные поиски железосодержащих руд. Съемка ведется по системам профилей, маршрутов, расстояния между которыми меняются от 200 до 500 м. Расстояния между точками не менее 50 м.

Целью поисково-разведочных магнитных съемок является детализация аномалий картировочно-поисковых съемок: выявление тектонических нарушений, оценка размеров, формы и положения рудных тел. Поисково-разведочные съемки выполняются в масштабах 1:10 000, 1 : 5 000, 1 : 2 000, 1 : 1 000. Съемка осуществляется по системам профилей, удаленных на расстояния 50 - 200 м, с шагом наблюдений от 10 до 50 м.

Целью детальных разведочных магнитных съемок является выяснение размеров, формы и положения включений пород с различными магнитными свойствами, разведка рудных месторождений, детальное геологическое картирование. Масштабы съемок от 1 : 2 000 и крупнее, а расстояния между профилями могут изменяться от 10 до 100 м. Расстояния между точками наблюдений меняются от 5 до 20 м в зависимости от размеров рудных тел, их глубины и интенсивности намагничивания.

### **Способы проведения полевой магнитной съемки**

Полевые магнитные съемки бывают профильными и площадными. Съемки по отдельным профилям используются при рекогносцировочных исследованиях для выявления общих закономерностей аномальных полей. Однако иногда интерпретационные профили задаются вкрест выявленных площадной съемкой аномалий. Основным же видом съемок являются площадные, выполненные по системам параллельных профилей.

Подходы к выбору сети наблюдений такие же, как и в гравirazведке (см. 2.2.2). Однако при магнитной съемке менее жесткие требования к топопривязке, отсутствует опорная сеть, а густота рядовых пунктов наблюдения несколько больше.

Сеть наблюдений разбивается как инструментально, так и визуально с измерением шагами расстояний между пунктами и инструментальной привязкой начала и конца профилей, а также исходной точки. Последняя выбирается на базе экспедиции. Здесь же желательно установить один магнитометр для снятия напряженности геомагнитного поля через 30-60 минут или магнитовариационную станцию для ее непрерывной записи. Эти приборы служат для расчета вариаций  $T_{вар}$ ,  $Z_{вар}$  геомагнитного поля в любое время  $t$ . Вариации

можно получить и из ближайших обсерваторий, удаленных от десятков до первых сот километров по мере уменьшения требований к точности съемки.

Расстояния между профилями берут в 3-5 раз меньше длины, а между точками съемки (шаг наблюдений) — в 3-5 раз меньше ширины предполагаемых аномалосоздающих объектов. Для стандартизации методики рекомендуют шаг съемки делать равным 1, 5, 20, 25, 50 или 100 м. Расстояния между профилями, направленными всегда вкрест предполагаемого простирания разведываемых структур или рудных тел, могут быть равны шагу или в 2 — 3 раза превышать его.

Разновидностью наземной магнитной съемки является микромагнитная. Это высокоточная съемка с точностью измерения  $T$ ,  $\Delta T$ ,  $\Delta Z$  до 1 нТл и шагом квадратной сети 1-5 м. Для исключений вариаций через несколько замеров на рядовых точках берется отсчет на опорном пункте.

Качество выдаваемых геомагнитных карт (кондиционность) определяется прежде всего густотой сети (расстояние между профилями должно составлять примерно 1 см в масштабе карты) и точностью съемки. Для оценки точности съемки на ряде точек (5-10% от общего количества) ведутся повторные наблюдения и рассчитывается средняя квадратическая погрешность измерений

$$\epsilon = \pm \sqrt{\frac{\sum \delta_i^2}{(2n - 1)}} \quad (2.15)$$

где  $\delta_i$  — разность отсчетов на  $i$ -той точке при основном и повторном замерах, а  $n$  — число повторных точек. Требования к точности наблюдений при наземной съемке устанавливаются в зависимости от масштаба съемок и напряженности магнитного поля. В слабых полях точность наблюдений должна быть высокой: среднеквадратическая погрешность съемки не больше  $\pm 5$  нТл при мелкомасштабных съемках и не больше  $\pm 2$  нТл при крупномасштабных. При наличии интенсивных магнитных аномалий (сотни и тысячи гамм) среднеквадратическая погрешность не должна превышать  $+(20-30)$  нТл.

### Результаты полевой магнитной съемки

В результате полевой съемки по наблюдаемым составляющим ( $T, \Delta T, \Delta Z$ ) рассчитываются аномальные магнитные поля (см. 2.3):

$$T_a = T - T_n - T_{\text{вар}}, \quad \Delta T_a = \Delta T - \Delta T_{\text{вар}}, \quad \Delta Z_a = \Delta Z - \Delta Z_{\text{вар}}, \quad (2.16)$$

где  $T_n$  — нормальное поле,  $T_{\text{вар}}$ ,  $\Delta T_{\text{вар}}$ ,  $\Delta Z_{\text{вар}}$  — вариации поля на время  $t$  замера  $T$ ,  $\Delta T$ ,  $\Delta Z$ . В выражениях для относительных параметров  $\Delta T_a$  и  $\Delta Z_a$  часто принимается, что  $T_0$  и  $Z_0$  на опорном пункте равны нулю. Это допустимо, если изучаемая площадь не превышает нескольких десятков квадратных километров. Для съемок больших территорий необходимо знать  $T_0$  и  $Z_0$ , т.е. "привя-

зять" опорные пункты к системам сети нормального магнитного поля Земли (см. 4.1.4).

Результаты магнитной съемки изображаются в виде графиков  $T_a$ ,  $\Delta T_a$  и  $\Delta Z_a$  (их называют иногда профилями), карт профилей и карт. На графиках по горизонтальной оси откладываются пикеты, по вертикали — аномалии магнитного поля (положительные значения -- вверх, отрицательные — вниз). При построении карт профилей на карте наносятся профили наблюдений, а перпендикулярно им откладываются аномалии. На картах у каждой точки записываются аномальные значения геомагнитного поля и проводятся линии равных значений. Сечение изолиний при построении карт должно быть в 2 — 3 раза больше точности определения аномалий.

## **Воздушная и морская магнитные съемки**

### **Аэромагнитная съемка**

Аэромагнитная съемка проводится по системе профилей при непрерывной записи  $T$  или  $AT$  на каждом профиле (маршруте). Направления профилей выбираются вкрест предполагаемого простирания структур или тектонических нарушений.

Расстояние между профилями зависит от масштаба съемки: при миллионном масштабе расстояния между маршрутами устанавливаются 10 км, при масштабе 1 : 500 000 — 5 км, при масштабе 1 : 100 000 — 1 км, при масштабе 1 : 50 000 — 500 м. Чем крупнее масштаб, тем меньшей должна быть высота полета аэромагнитной станции. Обычно она меняется от 50 до 500 м. Скорость полета 100 - 200 км. Привязка профилей при аэромагнитной съемке осуществляется разными способами: по аэрофотоснимкам, радиогеодезическая и др. и должна быть тем точнее, чем крупнее масштаб съемки.

Для учета вариаций и сползания нуля-пункта прибора перед началом рабочего дня и после его окончания делается специальный залет на опорный (контрольный) маршрут длиной до 10 км. Все рабочие маршруты "привязываются" к контрольным маршрутам.

Для оценки погрешности измерений и увязки между собой маршрутов выбирается несколько профилей, перпендикулярных рабочим маршрутам. На этих профилях проводятся повторные залеты. По результатам повторных измерений вычисляется среднеквадратическая погрешность измерений. Точность съемки считается хорошей, если погрешность не превышает  $\pm 10$  нТл или 20% от амплитуд выявленных аномалий. При обработке магнитограмм аномальные значения рассчитываются путем вычитания из наблюдаемого значения  $T$  нормального поля  $T_a$ . Последнее определяется по картам нормального магнитного поля или с помощью расчета так называемого нормального градиента по данным аэромагнитной съемки. В результате аэромагнитной съемки строятся карты, графики, а также карты графиков  $T_a$  или  $\Delta T_a$ .

## Гидромагнитная съемка

Гидромагнитная съемка в океанах, морях и на озерах ведется как на специальных судах, так и попутно на кораблях любого назначения. Для исключения влияния металлического корпуса судна применяются специальные приемы, а датчик поля буксируется за ним на кабеле длиной свыше 100 м в специальной немагнитной гондоле либо вблизи дна, либо на некоторой глубине. Профили (галсы) привязываются по штурманским картам. Съемки бывают профильными, реже площадными. В результате строятся графики, карты графиков и карты  $T_a$  или  $\Delta T_a$ .

### 6.10.3. Интерпретация и задачи, решаемые магниторазведкой

Интерпретация данных магниторазведки складывается из геофизической интерпретации и геологического истолкования, тесно связанных между собой. Первым этапом является качественная интерпретация, позволяющая судить о местоположении пород с разными магнитными свойствами. Второй этап - количественная интерпретация, или решение обратной задачи магниторазведки, — имеет целью определение количественных параметров разведываемых геологических объектов.

#### Качественная и количественная интерпретация данных магниторазведки

При качественной интерпретации графиков, карт графиков и карт магнитных аномалий ведется их визуальное выделение. При этом обращается внимание на форму изолиний, их простираие, ширину, соотношение положительных и отрицательных аномалий, абсолютные значения максимумов и минимумов. Далее, используя сведения о магнитных свойствах пород, устанавливают связь тех или иных аномалий магнитного поля с определенными геологическими образованиями.

Интерпретация гравитационных и магнитных аномалий имеет много общих черт. Это объясняется сходством основных законов взаимодействия гравитационных и магнитных масс (законов Ньютона и Кулона), что и привело к установлению математических связей между гравитационным и магнитным потенциалами. Наряду со сходством имеются и различия в природе и морфологии гравитационных и магнитных аномалий.

Аномалосоздающие объекты в гравиразведке однополярны, т.е. они создают либо положительные, либо отрицательные аномалии. Аномалообразующие объекты в магниторазведке дипольны, так как каждое намагниченное тело может создавать и положительную, и отрицательную аномалии. По этой причине структура аномального магнитного поля сложнее, чем гравитационного. Она дополнительно усложняется за счет разной длины тел по направлению

намагничивания, разного угла намагничивания, наличием индукционной и остаточной намагниченности пород.

Характерно, что почти для всей территории России намагниченность пород близка к вертикальной, поэтому графики и карты  $T_a$  и  $Z_a$  практически совпадают. При прямой вертикальной намагниченности центры магнитных масс выделяются положительными аномалиями. При наклоне вектора намагниченности, меньшем  $50^\circ$ , максимумы  $T_a$  несколько смещаются к югу от эпицентра аномалии  $Z_a$ , а на северных частях профилей наблюдаются слабые отрицательные аномалии. При горизонтальной намагниченности (в экваториальных районах) соотношение положительных и отрицательных аномалий примерно одинаково. Аномалии разделяют на составляющие, обусловленные различными по размерам намагниченными объектами. Основным методом такого разделения является пространственная частотная селекция, при которой магнитные аномалии разделяются по ширине. При этом полагается, что чем больше ширина, тем больше поперечные размеры и глубина залегания аномалосоздающих намагниченных тел.

Основными способами частотной селекции являются усреднение и пересчет в верхнее (для выделения низких частот) и нижнее (для подчеркивания высоких частот) полупространство. Используя эти способы, наблюденные карты и графики трансформируют во вспомогательные карты и графики, как это делается и при обработке гравитационных карт. На них подчеркиваются (становятся более наглядными) аномалии, обусловленные геологическими объектами разной природы, глубины и особенно разных горизонтальных размеров. Чем больше радиус усреднения и высота пересчета вверх, тем лучше выделяются аномалии большего периода, а значит, больших размеров, т.е. региональные аномалии. Чем больше глубина пересчета вниз, тем лучше подчеркиваются локальные особенности магнитного поля. Имея набор карт с разными уровнями пересчета, можно оценить пространственное изменение и характер источников поля.

На наблюденных или трансформированных картах выявляются и коррелируются аномалии, соответствующие одним и тем же объектам, намечается плановое расположение контактов различных пород, прослеживаются контуры, положение эпицентров, пространственное положение (падение, простираание) тех или иных структур или включений. Изометрическим аномалиям  $T_a$  и  $Z_a$ , у которых поперечные размеры на карте примерно одинаковы, соответствуют изометрические в плане геологические объекты; вытянутым изодинамам соответствуют геологические структуры, отдельные слои и рудные тела вытянутой формы.

Если для вертикально намагниченных тел поле аномалий  $Z_a$  имеет один знак, то это свидетельствует о большой глубине расположения другого полюса намагниченных пород, т.е. подошва тела залегает на глубине, в 5-6 раз большей, чем кровля. Если же глубина залегания нижней части тела мало отличается от глубины залегания верхней части, то вокруг интенсивной аномалии  $Z$  обязанной верхнему полюсу, будет наблюдаться слабое поле другого знака,

обусловленное нижним полюсом намагниченных пород. Направление наклона пород — в ту сторону, где площадь распространения слабых аномалий больше. Экстремумы аномалий пропорциональны магнитному моменту ( $J_s, J_v, J_l$ ), т.е. возрастают с интенсивностью намагничения ( $J = kT$ ), а значит с ростом полного вектора напряженности геомагнитного поля ( $T$ ) и магнитной восприимчивости ( $k$ ) аномалосоздающих объектов, а также их поперечного сечения ( $s$ ), объема ( $V$ ) или ширины ( $l$ ).

Участкам с высокими горизонтальными градиентами аномалий вертикальной составляющей геомагнитного поля часто соответствуют контакты пород с разными магнитными свойствами.

При наклонном и горизонтальном намагничении структура поля резко отличается от вертикально намагниченного поля.

### **Количественная интерпретация данных магниторазведки**

1 . *Общая характеристика количественной интерпретации.* Аппроксимация аномалосоздающих объектов телами простой геометрической формы, определение их глубины, размеров, точного местоположения, интенсивности намагничения — основная цель количественной (расчетной) интерпретации, или решения обратной задачи магниторазведки. Математически решение обратной задачи магниторазведки неоднозначно, так как похожие аномалии могут быть созданы геологическими телами разной формы, размеров и интенсивности намагничения. Для более однозначной интерпретации магнитных аномалий, и, в частности, оценки размеров тел, необходимо знать интенсивность намагничивания тел  $J$ , определяемую по измерениям магнитной восприимчивости образцов ( $J \sim kT$ ), значениям напряженности поля Земли  $T$ , а также дополнительные геологические сведения о наиболее вероятной форме объектов.

Как и в гравиразведке, для количественной интерпретации данных магниторазведки применяются прямые и косвенные методы. Среди прямых методов, используемых для обработки отдельных простых магнитных аномалий (локальных или региональных), наибольшее применение находят аналитические (или методы характерных точек) и палеточные (или методы сравнения). К косвенным относится ряд методов обработки сложных аномалий, в которых путем последовательного решения прямых задач методом подбора формы и глубины возмущающих масс добиваются совпадения наблюдаемой аномалии с теоретически рассчитанными. Эти методы базируются на использовании ЭВМ.

Начинается количественная интерпретация с определения местоположения, протяженности аномалосоздающих тел, их формы, глубины залегания. Далее аномалосоздающие объекты аппроксимируются телами простой геометрической формы. Для этого используются форма, знак аномалий и вся априор-



ная информация о форме ожидаемых намагниченных объектов изучаемого района.

Если на карте изодинам  $Z_a$  имеются изометрические аномалии, отличающиеся по поперечным размерам не более чем в 2-3 раза, то они могут создаваться либо телами столбообразной формы (при аномалиях одного, как правило, положительного знака), либо телами шарообразной формы (при наличии в центре аномалий одного знака, чаще положительного, а вокруг — кольцеобразных аномалий другого знака).

Примером столбообразных геологических объектов с глубоко залегающими нижними кромками могут быть столбообразные залежи железосодержащих руд, кимберлитовые трубки, штокообразные интрузии, куполовидные структуры и т.п.

Примером шарообразных геологических тел с неглубоко залегающими нижними кромками могут служить такие изометрические объекты, как брахи-антиклинальные и брахисинклинальные структуры, ядра которых сложены породами с повышенными магнитными свойствами; некоторые интрузии и лакколиты; массивные или чечевицеобразные залежи таких полезных ископаемых, как железные руды, бокситы, марганцевые руды и др.

Если на карте изодинам  $Z_a$  имеются аномалии вытянутой формы с изолиниями в виде эллипсов, большая ось которых более чем в 3-4 раза превосходит малую, то они могут создаваться пластообразными (при аномалиях одного знака) или цилиндрическими телами (при наличии в центре аномалий одного знака, а вокруг — другого).

Аномалии одного знака создаются круто залегающими пластами, пластообразными интрузиями, зонами нарушений, пластами метаморфических и осадочных пород, пластообразными залежами полезных ископаемых и др.

Вытянутые аномалии одного знака, окруженные полем другого знака, образуются над такими цилиндрическими геологическими объектами "бесконечного" простираения, но ограниченными по глубине, как синклинальные и антиклинальные структуры, линзообразные и веретенообразные рудные тела и т.п.

На картах изодинам  $Z_a$  могут наблюдаться вытянутые аномалии с одной стороны одного, а с другой — другого знака (зоны резких градиентов). Они связаны с крутыми контактами двух толщ или сбросами (уступами).

Практика магниторазведки показывает, что все одиночные магнитные аномалии с той или иной степенью приближения могут быть отнесены к рассмотренным пяти видам. Методы количественной интерпретации получены в результате анализа решений прямых задач над разными моделями. Рассмотрим некоторые из них.

*2. Метод характерных точек.* Сущность метода характерных точек при решении обратной задачи магниторазведки сводится к определению глубины залегания, оценке намагниченности и размеров тел по характерным точкам на графиках  $T_a$  и  $Z_a$ , которые при больших углах наклона практически совпадают.

Методы характерных точек подробно рассмотрены на примере интерпретации гравитационных аномалий. В магниторазведке их применение несколько проще, так как кроме формы аномалий на картах можно использовать и знак. Интерпретацию рассмотрим на примере  $Z_a$ , так как при обработке данных  $Z_a$  наиболее полно используется знак аномалий для подбора моделей.

Первый этап интерпретации методом характерных точек сводится к выделению на картах  $Z_a$  одиночных аномалий и сопоставлению создавших их тел с телами простой геометрической формы: вертикальный столб, шар, вертикальный пласт, горизонтальный цилиндр и другие, для которых решена прямая задача.

Таблица 6.10.2.

**Интерпретационная таблица для расчета параметров вертикально намагниченных тел простой геометрической формы методом характерных точек**  
( $Z$  в нТл, кв  $10^{-5}$  ед. СИ, линейные размеры в метрах)

| Форма и знак аномалий |           | Геометрическая модель  | Формула расчета, $Z_a$                        | Глубина залегания, $h$ или $H$ | Размеры                       |
|-----------------------|-----------|------------------------|-----------------------------------------------|--------------------------------|-------------------------------|
| Изометрическое        | один знак | вертикальный столб     | $\frac{Jsh}{\mu(x^2 + h^2)^{3/2}}$            | $1,3x_{1/2}$                   | $s = \frac{Z_{amax}h^2}{2J}$  |
|                       | два знака | шар                    | $\frac{JV(2H^2 - x^2)}{\mu(x^2 + H^2)^{5/2}}$ | $0,7x_0$                       | $V = \frac{2Z_{amax}H^3}{2J}$ |
| Вытянутые             | один знак | вертикальный тонкий    | $\frac{2Jlh}{\mu(x^2 + h^2)}$                 | $x_{1/2}$                      | $l = \frac{Z_{amax}h}{2J}$    |
|                       | один знак | горизонтальный цилиндр | $\frac{2Js(H^2 - x^2)}{\mu(x^2 + H^2)^2}$     | $x_0$                          | $s = \frac{Z_{amax}H^2}{2J}$  |

Для количественной интерпретации через середины выделенных аномалий, вкрест простирания аномалий, строится интерпретационный график  $Z_a$ . Ниже приведены примеры количественной интерпретации таких графиков. Центр тела залегает под центром главного (большого) экстремума (как правило, максимума  $Z_{amax}$ ), и лишь уступ располагается между  $Z_{amin}$  и  $Z_{amax}$ . Абсцисса эпицентра тела принимается за начало координат, и от нее влево и

вправо находятся абсциссы следующих характерных точек: 1)  $x_{1/2}$  для аномалий одного знака, в которых  $Z_a = 1/2Z_{amax}$ ; 2)  $x_0$  для аномалий двух знаков, в которой  $Z_a = 0$  (можно взять и другие характерные точки графика, на которых  $Z_a$  равна какой-нибудь доле от  $Z_{amax}$ ).

Зная  $x_{1/2}$  и  $x_0$ , с помощью табл. 6.10.2 можно определить глубину залегания верхней кромки  $h$  для тел, глубоко уходящих вниз, или глубину залегания центра //тел ограниченного распространения по глубине. Зная интенсивность намагничивания ( $J \sim kT$ ), можно рассчитать размеры намагниченных объектов.

Средняя относительная погрешность определения глубин методом характерных точек составляет 10-30%.

Из-за сложности выражений для  $Z_a$  над уступом простых аналитических зависимостей между глубинами его залегания и абсциссами характерных точек не существует.

Нижние кромки намагниченных тел  $h_n$ , ограниченных по глубине ( $h_n < 10h$ ) и ширине ( $l < 10h$ ), можно оценить по формуле для вертикальных пластов:  $h_n = 2x_{min} - 0,9l - 1,8h$ , где  $x_{min}$  — абсциссы точек с минимальными  $Z_a$ ,  $l$  — ширина пласта;  $h$  — глубина залегания верхней кромки,  $H$  — глубина центра тел.

**3. Метод касательных и другие оценочные методы.** На основе аналитических методов решения прямых и обратных задач магниторазведки для тел простой геометрической формы разработан ряд графических и палеточных способов интерпретации.

Из графических способов обработки магнитных аномалий рассмотрим простой способ приближенной количественной интерпретации — метод касательных. Сущность метода заключается в следующем. На графиках  $Z_a$  проводятся касательные, параллельные оси  $x$ , через максимум, минимум (если они есть), а также касательные вдоль боковых сторон аномалий через точки перегиба (рис. 6.10.8). Далее находятся точки пересечения всех касательных и определяются абсциссы точек пересечения  $x_1, x'_1, x_2, x'_2$ . Если на кривой  $Z_a$  минимумов нет (аномалии одного знака), то за точки  $x_1$  и  $x'_1$  берутся точки пересечения наклонных касательных с осью  $x$ . Приближенная глубина залегания верхней кромки тела, создавшего данную аномалию, рассчитывается по формулам:  $h = \frac{x_1 - x_2}{2}$  и  $h = \frac{x'_1 - x'_2}{2}$ . Среднее из полученных двух значений  $h$  и служит для оценки глубины залегания верхней кромки тела.

В зависимости от формы и отношения поперечных размеров к глубине истинная глубина залегания может меняться от  $0,5h$ , когда размеры тел больше глубины их залегания, до  $1,5h$ , если размеры тел меньше глубины их залегания.

В теории магниторазведки разработан ряд оценочных методов интерпретации. Так, максимальная глубина залегания верхней кромки вертикально намагниченных тел любой формы может быть оценена по формулам:

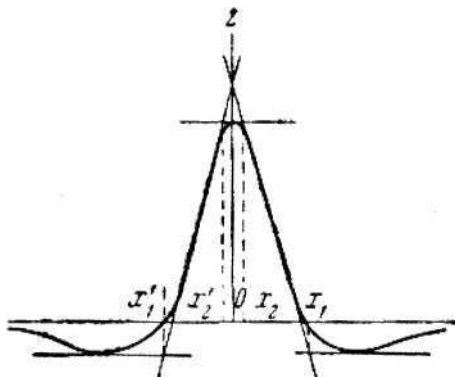


Рис. 6.10.8. Интерпретация аномалий вертикальной составляющей геомагнитного поля методом касательных

$$h < Z_{a\max} / \left( \frac{dZ_a}{dh} \right)_{\max}, \quad h < 2,6J \left( \frac{dZ_a}{dx} \right)_{\max}.$$

4. *Методы интерпретации с использованием ЭВМ.* Существуют различные алгоритмы и программы обработки, интерпретации данных магниторазведки с помощью ЭВМ. Так, разработаны методики автоматического построения карт магнитных аномалий, построения интерпретационных графиков через центры аномалий, пересчетов наблюдаемых полей в верхнее и нижнее полупространство, специального анализа полей. Однако самым важным применением ЭВМ является косвенная интерпретация путем последовательного сравнения наблюдаемых аномалий с теоретическими для разных моделей с меняющимися геометрическими и магнитными параметрами. Однако при любых методах интерпретации без достаточного количества геологической и другой независимой информации добиться единственности решения обратной задачи практически невозможно.

### Геологическое истолкование данных магниторазведки

1. *Особенности геологического истолкования данных магниторазведки.* Геологическое истолкование результатов магниторазведки — один из ответственных этапов интерпретации. Оно сводится к решению тех или иных геологических задач с помощью качественной и количественной интерпретации результатов магнитной съемки с использованием всего имеющегося материала о геологическом строении изучаемой площади. При этом необходимо установить связи между магнитными аномалиями и литологией, тектоникой, полезными ископаемыми.

Сложность проблемы геологического истолкования данных магниторазведки объясняется неоднозначностью и приближенностью решений обратных задач, поскольку прямые задачи решены для намагниченных тел правильной

формы (столб, шар, пласт, цилиндр и многие др.), в то время как реальные тела могут существенно отличаться от них. Вторым затруднением при интерпретации является необходимость определения интенсивности намагничения пород по образцам, что не всегда можно сделать даже приближенно. Наконец, неоднородность и разный угол намагничения пород, влияние остаточного намагничения древних эпох и ряд других причин также снижают точность интерпретации. Все это приводит к тому, что часто ограничиваются лишь качественной интерпретацией, а на полученные количественные параметры смотрят как на приближенные, дающие возможность лишь оценить глубину и размеры намагниченных тел.

Рациональный комплекс магниторазведки с гравиразведкой и другими геофизическими методами (в зависимости от геолого-геофизических особенностей района исследований) позволяет провести геологическое истолкование результатов более точно и достоверно.

2. *Благоприятные условия для проведения магниторазведки.* Благоприятными условиями для применения магниторазведки являются следующие.

1. Наличие горизонтальных магнитных неоднородностей, т.е. изменение намагниченности горных пород в горизонтальном направлении, происходящее на вертикальных или субвертикальных боковых границах геологических структур.

2. Достаточная теоретическая и экспериментальная обоснованность возможности решения поставленных геологических задач имеющейся аппаратурой и рациональной системой наблюдения.

3. Превышение в 3 -- 5 раз амплитуды аномалий уровня аппаратурно-методических погрешностей.

4. Наличие дополнительной геолого-геофизической и петрофизической (магнитной) информации о структурах для проведения более однозначной интерпретации.

## **Общие магнитные съемки Земли и палеомагнитные исследования**

Общие магнитные съемки Земли, как и палеомагнитные исследования, имеют важное значение и в магнитометрии для решения глобальных проблем магнетизма Земли и истории его изменения, и в магниторазведке, давая дополнительную информацию для исторической геологии, геотектоники и других дисциплин, например, археологии.

Поверхность суши и океанов покрывается общими, как правило, аэромагнитными и гидромагнитными съемками разных масштабов. По данным этих съемок строятся карты нормального и аномального магнитных полей крупных регионов и всей Земли.

Для выделения магнитных аномалий, связанных с неоднородностью строения кристаллической оболочки Земли, из измеренных значений аномалий  $T$  вычитается нормальное геомагнитное поле, которое представляет собой сумму поля однородного намагниченного шара и поля континентальных аномалий (см. 4.1).

Основное назначение общих магнитных съемок — проведение тектонического районирования, позволяющее определить контуры крупных структурных элементов земной коры: платформ, геосинклинальных областей, отдельных блоков, глубинных разломов, тектонически активных областей. Решение перечисленных задач проводится в комплексе с гравиразведкой и уточняется сейсморазведкой.

Таким образом, общие магнитные съемки позволяют решать задачи, связанные со строением земной коры, а также служат для решения таких общетектонических задач, как происхождение и развитие Земли и ее структурных элементов, изучение характера магнитного поля на поверхности и ряда других задач.

### **Палеомагнитные исследования**

Палеомагнитные исследования предназначены для определения магнитного поля Земли в отдаленные геологические эпохи путем изучения остаточного намагничения образцов горных пород (см. 4.2.3). Как отмечалось выше, породы, содержащие ферромагнитные минералы (магнетит, титаномагнетит, гематит, пирротин), обладают свойством, намагнитившись в магнитном поле Земли в момент своего образования, сохранять магнетизм долгое время, несмотря на изменение интенсивности и даже знака вектора напряженности геомагнитного поля в районе, где они залегают.

Изучая остаточную намагниченность образцов горной породы ( $J_r$ ), можно оценить положение геомагнитного полюса во время ее образования, если удалось доказать, что  $J_r$  не изменилась вследствие последующей перемагниченности или изменения положения породы в пространстве, например, вследствие тектонических нарушений.

При обработке достоверных данных о  $J_r$  предполагается, что вектор  $J_r$  пропорционален и параллелен полному вектору напряженности древнего (в момент образования породы) магнитного поля ( $T\delta\rho$ ). Кроме того, полагается, что это поле совпадает с геоцентрическим осевым магнитным диполем. В результате палеомагнитных исследований получены следующие выводы.

1. Среднее положение геомагнитных полюсов для промежутков времени в сотни тысяч лет совпадает с географическим полюсом, а магнитный диполь, создающий геомагнитное поле, направлен вдоль оси вращения Земли. Иногда они расходятся, как это наблюдается в настоящее время. Этот факт подтверждается палеоклиматическими данными.

2. Магнитные полюса в течение геологической истории Земли перемещаются по ее поверхности, что можно объяснить изменением положения оси вращения Земли, что также подтверждается палеоклиматическими исследованиями. Например, северный магнитный полюс в докембрии был на Западном побережье Северной Америки, в кембрии и силуре — в районе Японских островов, в карбоне и перми — на восточном побережье Азии, начиная с неогена, полюс оставался недалеко от современного.

3. Направление остаточной намагниченности горных пород в зависимости от их возраста иногда отличается на  $180^\circ$ , что связано с периодическим изменением знака магнетизма или инверсий полюса на  $180^\circ$ . Установлено, что примерно половина исследованных пород имеет намагниченность, противоположную современному магнитному полю. Длительность эпох магнетизма одного знака, эпох полярности менялась в истории Земли за последние 70 млн. лет с периодичностью от 10 тысяч до 1 млн. лет, а в более древние времена — до нескольких десятков млн. лет. Достаточных обоснований инверсии магнитных полей нет.

4. Местоположения полюсов Земли, определенные по образцам одного возраста, но взятых с разных континентов (Европа, Америка, Австралия) отличаются тем больше, чем больше возраст пород. Это объясняют дрейфом литосферных плит. Карты палеоконтинентов в разные геологические эпохи свидетельствуют о разных направлениях их перемещений, о расхождениях и столкновениях материков.

5. Гидромагнитные съемки океанов выявили линейные, знакопеременные, полосовые геомагнитные аномалии, симметричные относительно срединно-океанических хребтов (рифтов). Это, наряду с палеомагнитными исследованиями, является прямым доказательством раздвижения (спрединта) морского дна от этих хребтов.

В целом палеомагнитные исследования помогают решать проблему строения и развития Земли, корреляции разновозрастных пород (магнитостратиграфии), тектонического строения отдельных районов, анизотропии осадочных пород на основе их палеомагнитной слоистости, археологии и др.

### **Применение магниторазведки для картирования, поисков и разведки полезных ископаемых, изучения геологической среды**

Магниторазведка применяется для решения задач региональной структурной геологии, геологического картирования разных масштабов, поисков и разведки железорудных месторождений, поисков месторождений рудных и нерудных ископаемых, оценки геолого-петрологических особенностей и трещиноватости пород, изучения геологической среды.

### **Решение задач региональной геологии**

В комплексе с другими геофизическими методами магниторазведку применяют для решения задач региональной геологии и структурно-тектонического районирования, т.е. выделения таких региональных структур, как краевые межгорные прогибы, антиклинории и синклинории, зоны разломов, контактов пород разного состава, своды и впадины кристаллического фундамента. Магниторазведка особенно эффективна для картирования интрузивов и эффузивов, выделяющихся высокими значениями индуцированной ( $J_i \sim kT$ ) и остаточной ( $J_r$ ) намагниченностей. В пределах континентов аномальные магнитные поля в значительной степени определяются составом кристаллического фун-

дамента докембрийского возраста и зависят от  $J_i$ . В районах с мощным чехлом осадочных отложений, как правило, немагнитных, "прозрачных" для магнито-разведки, этим методом картируются аномально намагниченные породы фундамента. Аномальные поля океанов обязаны преимущественно  $J_r$ , создающей полосовые магнитные аномалии разного знака, параллельные рифтовым зонам.

Характерна тесная качественная связь магнитных и гравитационных аномалий: местоположение, простираение и общая форма этих аномалий чаще всего совпадают. Однако, в отличие от гравитационных, магнитные аномалии в большей степени зависят от магнитных свойств и состава пород, чем от глубины залегания и формы структур. По этой же причине гравитационные и магнитные аномалии одного района иногда не совпадают друг с другом.

### **Применение магниторазведки при геологическом картировании разных масштабов**

При мелкомасштабном геологическом картировании в настоящее время применяется аэромагниторазведка. Аэромагнитные съемки являются картировочно-поисковыми. С помощью наземных магнитных наблюдений ведутся как картировочно-поисковые, так и поисково-разведочные и разведочные съемки. Карты  $T_a$  и  $Z_a$ , указывают на форму и местоположение пород с повышенными магнитными свойствами, дают магнитные характеристики различных групп слабо магнитных пород. Особенно четко выявляются контакты осадочных и магматических пород (под наносами), глубинные разломы, с которыми часто связано внедрение магнитных пород, местоположения интрузий и эффузивных комплексов, железорудные месторождения. Материалы магнитных съемок используются в качестве основы для рациональной постановки геолого-съемочных и поисковых работ.

### **Применение магниторазведки для поисков полезных ископаемых**

Поиски и разведка железорудных месторождений — задача, лучше всего решаемая магниторазведкой. Исследования начинаются с проведения аэромагнитных съемок масштаба 1 : 100 000. Железорудные месторождения выделяются очень интенсивными (сотни и тысячи гамм) аномалиями  $Z(T)$ . Детализация аномалий проводится наземной съемкой. При этом ведется не только качественная, но и количественная интерпретация, т.е. оценивается глубина залегания магнитных масс, простираения, падения, размеры железосодержащих пластов, а иногда по интенсивности намагничения даже качество руды.

Наиболее благоприятны для разведки магнетитовые руды, менее интенсивными аномалиями выделяются гематитовые месторождения.

### **Поиски месторождений рудных и нерудных полезных ископаемых**

Магниторазведка применяется при поисках таких полезных ископаемых, как полиметаллические, сульфидные, медно-никелевые, марганцевые руды, бокситы, россыпные месторождения золота, платины, вольфрама, молибдена



и др. Это оказывается возможным благодаря тому, что в рудах в качестве примесей часто содержатся ферромагнитные минералы или же они сами обладают повышенной магнитной восприимчивостью. Кроме того, по данным магнитной съемки выявляются зоны, благоприятные рудообразованию (сбросы, контакты и т.п.). Отличные результаты получаются при разведке кимберлитовых трубок, к которым приурочены месторождения алмаза.

### **Изучение геолого-петрографических особенностей и трещиноватости пород**

Изучение геолого-петрографических особенностей и трещиноватости пород может выполняться микромагнитной съемкой с густой сетью ( $1 \times 1$ ,  $3 \times 3$  и  $5 \times 5$  м) наблюдений и высокой точностью (до 1 нТл). Этот метод применяется для геолого-петрографических исследований пород, залегающих на глубине до 10-20 м. В результате строятся карты  $Z_0$ , а изодинамы проводятся через 2, 3, 5 нТл. Далее проводится статистическая обработка карт изодинам. Каждую изолинию разбивают на отрезки длиной 5-10 мм. Далее определяется азимут каждого из них, затем по числу отрезков одинакового азимута ( $n$ ) строят розы направления изодинам (по странам света откладываются отрезки длиной, пропорциональной  $n$ , а концы отрезков соединяются). Максимумы на них выявляются зоны преобладающей трещиноватости.

#### **Изучение геологической среды**

При изучении геологической среды для решения инженерно-геологических, гидрогеологических, мерзлотно-гляцио-логических и экологических задач магниторазведка используется прежде всего на этапах как общего, так и специализированных видов картирования. Высокая точность современных полевых магнитометров (ошибки в определении аномалий поля около 1 нТл) обеспечивает возможность разделения по литологии пород по степени их немагнитности. Детальные, в том числе микромагнитные, съемки можно использовать для изучения участков под ответственное строительство с целью литолого-петрографического расчленения пород и выявления их трещиноватости, разрушенности, закарстованности. Эти же методики можно применять для выявления трещинно-карстовых подземных вод в скальных породах. Периодически повторяемые детальные съемки оползней, в которые заглублены металлические стержни, обеспечивают возможность определения направления и скорости их движения. Имеются положительные примеры картирования залежей подземных льдов (крупных ледяных внутригрунтовых тел и повторно-жильных льдов). С успехом используются археомагнитные исследования для решения некоторых археологических задач. Детальная магнитная съемка и каппаметрия (полевые определения магнитной восприимчивости) несут информацию о концентрации гумуса и солей в почвах, загрязненности грунтов тяжелыми металлами, отходами промышленных производств, нефтехимическими продуктами.

## Глава 7.

# МАГНИТНЫЕ МЕТОДЫ И СРЕДСТВА НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ И ДИАГНОСТИКИ МАТЕРИАЛОВ, ИЗДЕЛИЙ И КОНСТРУКЦИЙ

### 7.1. Физические основы магнитных методов

Магнитный вид неразрушающего контроля пользуется заслуженной любовью специалистов в области дефектоскопии металлических конструкций. Это не случайно, ибо подавляющая часть металлических инженерных конструкций таких, как магистральные трубопроводы, резервуары, цистерны, корпуса судов, стрелы башенных кранов и др., создается из сталей, обладающих ферромагнитными свойствами.

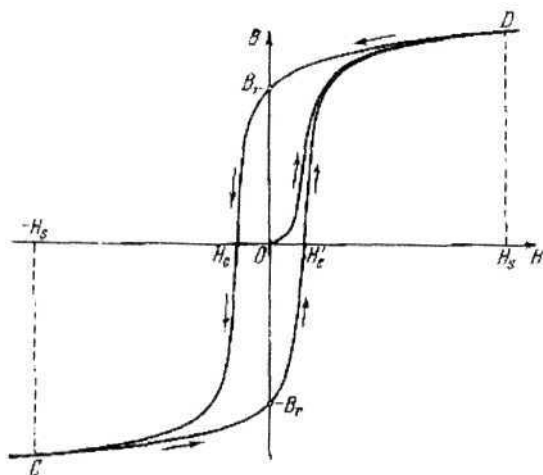


Рис.7.1.1. Явление магнитного гистерезиса

Практически применимые методы магнитного вида неразрушающих методов контроля (НМК), как правило, основаны на корреляционных связях между физико-химическими, механическими свойствами и структурными состояниями материала контролируемого участка конструкции и одной или несколькими магнитными характеристиками среды. Наиболее полно магнитные характеристики среды отражены в зависимости, известной под названием "петля магнитного гистерезиса".

Наиболее известны "однопараметровые" варианты магнитных НМК.

На производстве широко применяется метод, основанный на измерении коэрцитивной силы  $H_c$  металла в точке контроля. Для его реализации разработан целый ряд приборов — коэрцитиметров. Принцип работы таких приборов обычно состоит в исполнении следующей последовательности операций: а) намагничивание контролируемого участка детали накладным преобразователем, б) последующее размагничивание этого участка нарастающим полем, в) фиксации напряженности поля, соответствующей коэрцитивной силе (это делается в процессе выполнения п."б").

Все современные приборы снабжены встроенными микропроцессорами, обеспечивающими автоматический контроль по заданной программе с обработкой результатов контроля. Измерение коэрцитивной силы материала изделий, как правило, находится в диапазоне от 150 до 6000 А/м. Однако, это не снимает их главный принципиальный недостаток — коэрцитивная сила одновременно зависит от целой гаммы физико-химических и структурных свойств среды (твердости, предела текучести, предела прочности, температуры отпуска, химического состава, различия сорта стали, чугуна, толщину закаленного слоя, ударную вязкость, деформационное состояние и др.). Если все, кроме одного, факторы примерно постоянны, что бывает в пределах одной конструкции, то коэрцитиметр позволяет выявить аномалии, часто связанные с искомым состоянием материала. Но, если перед Вами стоит задача обследования группы конструкций или достаточно протяженного участка трубопровода, то здесь коэрцитиметр может подвести. Дело в том, что коэрцитивная сила  $H_c$  — это всего одна точка на петле гистерезиса. Свойства могут измениться так, что  $H_c$  сохранит свое значение, хотя магнитные свойства и, следовательно, петля гистерезиса коренным образом будут отличаться от условий калибровки. И в этом случае точность измерений коэрцитивной силы ни коим образом не улучшит достоверность дефектоскопии.

Другое направление магнитного вида дефектоскопии связано с попыткой контролировать техническое состояние конструкции по остаточной индукции  $B_r$ . Здесь в качестве детекторов параметров магнитного состояния металла используют различные магниточувствительные элементы — феррозонды, датчики Холла и пр. Суть заключается в том, что замечено — в окрестности дефекта и аномалий напряженно-деформированного состояния металла значение остаточной индукции существенно отличается от "нормального". Принцип работы таких приборов обычно состоит в намагничивании **до насыщения** контролируемого участка детали накладным преобразователем и последующем размагничивании этого участка нарастающим полем и измерение амплитуды сигнала с датчика Холла или с помощью феррозондов, соответствующей остаточной магнитной индукции, после размагничивания предварительно заданным током. В простейших приборах используют мощные постоянные магниты.

Этот принцип используется не только в переносных дефектоскопах, но и на вагонах-дефектоскопах (дефектоскопия рельс) и в кроулерах — снарядах внутритрубной диагностики.

Также, как и в вышерассмотренной группе методов, здесь есть одна "неприятность" -- остаточная индукция зависит одновременно от целого ряда факторов (напряженно-деформированное состояние, физико-химический состав и т.д.).

Обратим внимание на то, что *металл в зоне контроля непременно должен быть намагничен до насыщения!* Дело в том, что в противном случае остаточная индукция не будет метрологически обоснованной характеристикой — ее значение будет сильно зависеть от стабильности максимального значения намагничивающего поля. Если же намагничивающее поле превышает уровень насыщения, то независимо от величины такого превышения значение остаточной индукции будет именно тем, каким является фактическая остаточная индукция. По этой причине портативные варианты магнитоиндукционных приборов следует применять с большой осторожностью.

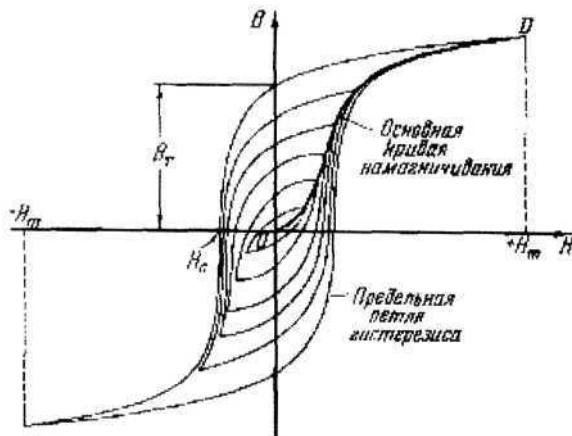


Рис.7.1.2. Семейство симметричных петель гистерезиса

Поясним на примере. Пусть металл циклически намагничивают и размагничивают полями с возрастающим значением напряженности  $H_m$ . При этом магнитное состояние металла будет описываться соответствующими симметричными (частными) петлями гистерезиса. Как только размах напряженности намагничивающего поля превысит значение  $H_s$ , дальнейшее увеличение напряженности поля будет приводить только к удлинению "хвостов" петли гистерезиса. Значения коэрцитивной силы и остаточной индукции будут оставаться неизменными.

Однако, не всегда эти условия могут соблюдаться. Здесь сказываются и геометрические характеристики конструкции, и энергетические возможности системы намагничивания, и многие другие факторы.

Также, как и в случае с коэрцитивной силой, возможны ситуации, когда одно и то же значение остаточной индукции обнаруживается у материалов с различными магнитными состояниями, то есть у материалов с разными формами петель гистерезиса. Это не удивительно, ибо остаточная индукция — это всего лишь одна точка сложной функции. Иными словами, главный принципиальный недостаток магнитоиндукционных методов состоит в том, что остаточная индукция одновременно зависит от целой гаммы физико-химических и структурных свойств среды (твердости, предела текучести, предела прочности, температуры отпуска, химического состава, различить сорта стали, чугуна, толщину закаленного слоя, ударную вязкость, деформационное состояние и др.). Поэтому нередки ситуации, когда магнитоиндукционные дефектоскопы пропускают весьма опасные дефекты. Это не вина разработчиков приборов или дефектоскопистов — это "природа", физика.

Здесь вполне уместно обратить внимание на неоправданный ажиотаж вокруг так называемого "метода магнитной памяти металла" (ММПМ).

Суть ММПМ заключается в определении *частной* остаточной индукции металла обследуемого участка конструкций, аномалии которой должны (по мнению пропагандистов метода) указывать на напряженное состояние и дефекты. По публикациям пропагандистов этого метода следует, что частная остаточная намагниченность металла иногда достигает 600 — 900 А/м.

Уровень частной остаточной индукции первоначально формируется в *случайном* магнитном поле в месте, где участок конструкции остыл ниже точки Кюри, например, после термического разогрева при сварочных работах. Почему "в случайном" магнитном поле? Дело в том, что магнитное поле Земли варьирует в широких пределах в зависимости от долготы и широты. В окрестностях некоторых дефектов и зон с остаточной пластической деформацией возникают незначительные аномалии намагниченности металла. Для дальнейшего изменения намагниченности металла требуется внешняя энергия. Магнитного поля Земли для этого недостаточно. Однако в производственных условиях еще сильнее, чем от географических координат, магнитное поле изменяется от технологических местных условий — мощные линии электропередач, сварочные аппараты, трансформаторы...

Как правило, именно эти, местные магнитные условия — не известны. Стало быть распределение параметров намагниченности металла в дефектных и бездефектных участках изначально является случайным: различие в намагниченности дефектных и бездефектных участков есть, но уровни намагниченности полностью зависят от местных условий. Кроме того, как мы показали выше, частная остаточная индукция зависит от текущего значения механического напряжения.

Наконец, такая ситуация. Труба изготовлена в заводских условиях где-нибудь в Саратове, а сварку осуществляли в Салехарде. Тут и магнитные поля Земли существенно различны, да и промышленные условия не совпадают. Вот и получается, что магнитное состояние основного металла сформировано в

одних условиях, а околошовная зона перемагнитилась совсем в других условиях.

То есть значение частной остаточной индукции может варьировать (по абсолютному значению) от нуля до истинной остаточной индукции. Стало быть, это не может быть метрологически достоверной характеристикой (в целях измерения параметров напряженного состояния и т.п.). Поэтому, сохраняя все недостатки традиционных вариантов магнитоиндукционной дефектоскопии, "метод магнитной памяти" привносит целый букет неопределенностей. Не случайно в паспортах таких приборов, именуемых как "Измеритель механических напряжений" и др., указывают показатели магнитоизмерительных приборов, а не, собственно, измерителей механических напряжений.

Вместе с тем, этот частный случай магнитоиндукционных методов вполне интересен для использования на стадиях *предварительных* обследований конструкций в качестве ИНДИКАТОРА развитых особо опасных дефектов и мест с закритическим состоянием металла.

## **7.2. Методы неразрушающего контроля и диагностики трубопроводов на основе эффекта Баркгаузена**

Итак, об усиленно пропагандируемой дефектоскопии средствами на основе эффекта Баркгаузена. Сегодня это, прежде всего, приборы типа замечательные StressScan и PollScan.

Суть физики процесса в следующем.

Ферромагнитные материалы состоят из намагниченных продолговатых микрообластей, которые называют **доменами**. Если участок металла намагничивать, то размеры и направления доменов изменяются. Эти изменения происходят скачками — домены "сопротивляются" внешним воздействиям. Чтобы скачок произошел, нужна некая внешняя сила. Эту силу можно привнести либо увеличивая магнитное поле, либо иным способом, например, механическим — нагружая материал.

Из-за этого число скачков зависит от величины магнитного поля и напряжения, которое испытывает металл.

Как только происходит скачок, то из-за микроизменения магнитного состояния доменной области рождается электромагнитная волна. Ее можно зарегистрировать общеизвестными способами. Чаще всего для этого используют катушку индуктивности. С ее помощью акт свершения скачка преобразуется в электрический импульс. Ну, а дальше не составит труда выполнить подсчет таких электрических импульсов. Щелчков много, металл как бы "шумит". Такие электрические импульсы были названы в честь их первооткрывателя — **шумом Баркгаузена**.

Магнитное поле можно достаточно точно задать с помощью электромагнита. Если теперь взять образец металла, закрепить его в разрывной машине и начать нагружение металла образца (то есть изменять напряженное состояние металла), то прибором можно будет определить сколько щелчков регистриру-

ется при каждом уровне механического напряжения и при каждом уровне магнитного поля.

После этого, поместив прибор на контролируемом изделии можно измерить сколько будет щелчков при заданном уровне намагничивания металла. В простейших устройствах количество щелчков преобразуют в амплитуду регистрируемого сигнала. В материалах, имеющих "положительную *магнитную анизотропию*" (железо, кобальт, стали), при сжатии металла интенсивность шума Баркгаузена снижается, а при растяжении — увеличивается.

Именно этот эффект используется в приборах StressScan 500C и PollScan-200. Время измерения (без обработки) в одной точке до 2 секунд (в рекламных материалах объявляют время в 10 раз меньшее). Это вполне приемлемо для практики.

Однако, этот метод, прекрасный для лабораторных условий и высокотехнологических производств, не может применяться на трубах магистральных трубопроводов, при контроле стальных резервуаров, мостовых конструкций, в судостроении и пр.

Электромагнитная волна, проявляемая в виде щелчков Баркгаузена, достаточно высокочастотная. Из-за этого она не может выйти из слоя металла с глубины более 0,2 мм (в лабораторных условиях с большим трудом ее можно зарегистрировать для глубин менее 2,0 мм!). Что творится в более глубоких слоях — останется "тайной".

Щелчкам Баргаузена присущ эффект, подобный *эффекту Кайзера* в акустической эмиссии: если металл ранее был нагружен до некоторого напряженного состояния, то при повторном нагружении того же уровня щелчки не будут зарегистрированы, пока это механическое напряжение не будет превзойдено. Поэтому, если трубопровод прошел стадию "опрессовки" давлением, более высоким, чем рабочее давление, то зарегистрированный шум не будет отражать характеристику фактического напряженного состояния. На показания приборов, основанных на эффекте Баркгаузена, влияет *магнитоупругий гистерезис*, то есть предыстория напряженного состояния конструкции и многие другие факторы, "убийственные" и для вихретоковых приборов, и для приборов на основе "магнитной памяти" и других (кроме приборов "*Комплекс-2.05*").

На показания прибора влияет состояние поверхностного слоя металла ("зоны наклепа"), где напряжения превышают напряжения основного металла в тысячи раз. Прибор учитывает состояние металла в слоях всего лишь до 0,2 мм, то есть как раз из "зоны наклепа".

Результаты измерений надо дополнительно подвергать сложной математической обработке. Это влечет за собой расходы на приобретение специального (!) вычислительного оборудования, занимающего целый салон (фургон) автомобиля Mercedes, на обучение и содержание дополнительного штата высококвалифицированных специалистов по обработке данных и т.д.

Карты концентраторов напряжений, а тем более, консультаций, эти приборы "напрямую" не дают — надо подождать, пока дополнительно поработает

персонал вычислителей, да металловедов-прочнистов, да расчетчиков...., тогда карта будет, но без комментариев, подобных тем, что приходят с картами на дисплей при работе с прибором "Комплекс-2.05", к тому же "расчетная" карта, а не "фактическая".

Из всего представленного не должно сложиться чисто отрицательное отношение к этому методу — каждый метод имеет достоинства и недостатки. Но достоинства проявляются в области применимости метода. Просто для трубопроводов, резервуаров и сосудов высокого давления сегодня этот метод еще сложно использовать.

### **7.3. Метод Магнитной Памяти Металла**

Традиционные методы и средства диагностики (УЗД, МПД, рентген) направлены на поиск уже развитых дефектов и по своему назначению не могут предотвратить внезапные усталостные повреждения оборудования — основные причины аварий и источники травматизма обслуживающего персонала.

Известно, что основными источниками возникновения повреждений в работающих конструкциях являются зоны концентрации напряжений (КН), в которых процессы коррозии, усталости и ползучести развиваются наиболее интенсивно. Следовательно, определение зон КН является одной из важнейших задач диагностики оборудования и конструкций.

Процессами, предшествующими эксплуатационному повреждению, являются изменения свойств металла (коррозия, усталость, ползучесть) в зонах концентрации напряжений. Соответственно, изменяется намагниченность металла, отражающая фактическое напряжённо-деформированное состояние трубопроводов, оборудования и конструкций.

В настоящее время в России разработан и успешно внедряется на практике принципиально новый метод диагностики оборудования и конструкций, основанный на использовании магнитной памяти металла (ММП). ММП объединяет потенциальные возможности неразрушающего контроля (НК) и механики разрушений, вследствие чего, имеет ряд существенных преимуществ перед другими методами при контроле промышленных объектов.

Основные практические преимущества нового метода диагностики, по сравнению с известными магнитными и другими традиционными методами неразрушающего контроля (НК), следующие:

- применение метода не требует специальных намагничивающих устройств, так как используется явление намагничивания узлов оборудования и конструкций в процессе их работы;
- места концентрации напряжений от рабочих нагрузок, заранее не известные, определяются в процессе их контроля;
- зачистки металла и другой какой-либо подготовки контролируемой поверхности не требуется;



- для выполнения контроля по предлагаемому методу используются приборы, имеющие малые габариты, автономное питание и регистрирующие устройства;

- специальные сканирующие устройства позволяют контролировать трубопроводы, сосуды, оборудование в режиме экспресс — контроля со скоростью 100 м/час и более.

ММП является наиболее пригодным для практики методом НК при оценке фактического напряженно-деформированного состояния. Поэтому использование нового метода диагностики наиболее эффективно для ресурсной оценки узлов оборудования.

Предлагаемый метод диагностики, основанный на использовании магнитной памяти металла, позволяет выполнить интегральную оценку состояния узла с учётом качества металла, фактических условий эксплуатации и конструктивных особенности узла.

Основная задача ММП - - определение на объекте контроля наиболее опасных участков и узлов, характеризующихся зонами КН. Затем, с использованием, например, УЗД в зонах КН определяется наличие конкретного дефекта. На основе поверочного расчёта на прочность наиболее напряжённых узлов, выявленных ММП, выполняется оценка реального ресурса оборудования.

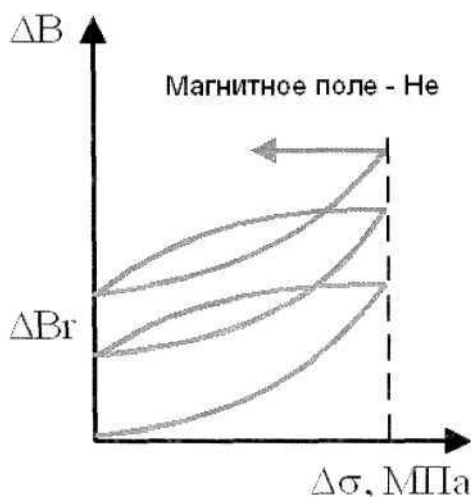
Кроме того, ММП и соответствующие приборы контроля позволяют:

- выполнять раннюю диагностику усталостных повреждений и прогнозировать надёжность оборудования;
- документировать результаты контроля и составлять банк данных о состоянии оборудования;
- осуществлять экспресс-сортировку новых и старых деталей по их предрасположенности к повреждениям;
- определять на объекте контроля с точностью до 1 мм место и направление развития будущей трещины, а также фиксировать уже образовавшиеся трещины;
- в отдельных случаях контролировать трубопроводы, сосуды без снятия изоляции.

Что же принципиально нового в предложенном методе контроля?

Из анализа известных магнитных методов вытекают следующие обязательные условия их применения. Во-первых, обязательно используются намагничивающие устройства, и, во-вторых, известные магнитные методы могут применяться эффективно лишь при условии, что места концентрации напряжений и дефектов в объекте контроля заранее известны. Кроме того, известные магнитные методы контроля, как правило, требуют зачистки металла и других подготовительных операций. Очевидно, что использование традиционных магнитных методов контроля в протяжённых конструкциях и на оборудовании при таких условиях практически невозможно. Например, специально намагнитить трубную систему, общая протяжённость которой на современном энергетическом котле достигает 500 км, задача нереальная. Знать заранее места концентрации напряжений (основные источники развития повреждений) на

каждой трубе котла не представляется возможным из-за влияния на их образование различных технологических, конструкционных и эксплуатационных факторов.



В тоже время известно, что большинство металлоконструкций и оборудования, изготовленных из ферромагнитных материалов, под действием рабочих нагрузок подвержены "самонамагничиванию" в магнитном поле Земли.

На рисунке показана схема проявления магнитоупругого эффекта, вызывающего рост остаточной индукции ( $\Delta Br$  — изменение остаточной индукции;  $\Delta B$  — изменение циклической нагрузки;  $H_e$  — внешнее магнитное поле). Если в каком-то месте конструкции действует циклическая нагрузка, и есть внешнее магнитное поле (например, поле Земли), то в этом месте происходит рост остаточной индукции и остаточной намагниченности.

С явлением "самонамагничивания" оборудования и конструкций повсеместно борются (судостроение, энергетика, шарикоподшипниковая и другие отрасли). Изучив это явление намагничивания на примере работы котельных труб, было впервые предложено использовать его для целей технической диагностики. При "самонамагничивании" оборудования и конструкций проявляются различные эффекты магнитострикции. Однако, используется при новом методе контроля последствие (во всех разновидностях эффектов магнитострикции), которое проявляется в виде магнитной памяти металла к фактическим деформациям и структурным изменениям в металле оборудования.

Магнитная память металла — необратимое изменение намагниченности, обусловленное напряжениями, превышающими средний уровень внутренних напряжений, возникающими на объекте контроля под действием рабочих нагрузок в слабом магнитном поле Земли. Для деталей машин и сварных соединений магнитная память металла проявляется в виде остаточной намагниченности, сформировавшейся после изготовления и охлаждения в магнитном поле Земли и отображающей их структурную и технологическую наследственность.

Метод магнитной памяти металла — метод неразрушающего контроля, основанный на регистрации собственных магнитных полей рассеяния (СМПР), возникающих на оборудовании в зонах концентрации напряжений под действием рабочих нагрузок в магнитном поле Земли. Ни при каких условиях с искусственным намагничиванием в работающих конструкциях такой источник информации, как собственное магнитное поле рассеяния, возникающее на скоплениях дислокаций в зонах КН, получить невозможно. Только в малом внешнем поле, каким является магнитное поле Земли, в нагруженных конструкциях, когда энергия деформации намного превосходит энергию внешнего магнитного поля, такая информация формируется и может быть получена.

Для отдельных деталей и изделий, а также для сварных соединений ММП основан на регистрации СМПР, возникающих в зонах концентрации остаточных напряжений после их изготовления и охлаждения в магнитном поле Земли. В процессе изготовления любых ферромагнитных изделий (плавка,ковка, термическая и механическая обработка) механизм возникновения реальной магнитной текстуры происходит одновременно с кристаллизацией при охлаждении, как правило, в магнитном поле Земли. В местах наибольшей концентрации дефектов кристаллической решётки (например, скоплений дислокаций) и неоднородностей структуры образуются узлы закрепления доменных стенок с выходом на поверхность изделия в виде линий смены знака магнитного поля рассеяния  $H_p$ . При этом линия  $H_p=0$  соответствует сечению детали с максимальным магнитным сопротивлением и характеризует зону максимальной неоднородности структуры металла и, соответственно, зону максимальной концентрации внутренних напряжений (ЗКН).

В настоящее время в энергетике, химической, нефтехимической, нефтегазоперерабатывающей, нефтяной, газовой и в других отраслях промышленности России разработаны и применяются на практике более 20-и руководящих документов и методик контроля. Проведён комплекс исследований по теоретическому обоснованию метода в содружестве с рядом институтов России. Разработаны количественные и качественные критерии, позволяющие осуществлять раннюю диагностику усталостных повреждений оборудования - *методики контроля с использованием ММП.*

Многолетний опыт исследования магнитных полей на котельных и паропроводных трубах выявил наличие устойчивых линий смены знака нормальной составляющей напряжённости магнитного поля  $H_p$  в зонах развивающихся повреждений металла. Именно этот диагностический параметр (линия  $H_p=0$ ) был положен в основу методик контроля оборудования. Интерпретация этого диагностического магнитного параметра, как линии главных напряжений, возникающей на поверхности труб под действием рабочих нагрузок, дана в специальной работе.

В период времени с 1990 по 2000 годы специалистами ООО "Энергодиагностика" выполнены промышленные исследования с оценкой состояния более 300 паровых и водогрейных котлов, более 200 паровых и газовых турбин, более 200 сосудов и аппаратов, более 100 км трубопроводов различного технологи-

ческого назначения; выполнен контроль качества изделия машиностроения более чем на 50-ти заводах и фирмах в России и в других странах, экспериментальный контроль рельс и колесных пар на предприятиях железнодорожного транспорта, мостовых конструкций, грузоподъёмных механизмов и других технических объектов.

Подготовлены два проекта ГОСТов:

Метод магнитной памяти металла. Термины, определения и обозначения.

Методика отбора представительных проб и образцов для механических, структурных и технологических испытаний с использованием магнитной памяти металла.

Значительный опыт промышленных и лабораторных исследований, наличие методик, руководящих документов, научно-технических отчётов позволили разработать нормативно-техническую документацию (НТД) по аттестации метода магнитной памяти металла, приборов контроля и персонала. В НТД, кроме методик и РД, входят: требования к техническим знаниям специалистов, изучающих ММП; программа обучения специалистов I, II, и III уровней (согласована с Госгортехнадзором России); паспорта и технические условия на приборы контроля; правила эксплуатации, методики поверки и испытаний приборов контроля; руководство пользователя программным продуктом для обработки результатов контроля на ЭВМ; учебное пособие.

## Литература

*А.А.Дубов А.С. 2029263.* Патент России и стран СНГ. Способ определения остаточных напряжений в изделиях из ферромагнитных материалов. Бюллетень изобретений, №5, 1995.

Материалы первой международной научно-технической конференции: "Диагностика оборудования и конструкций с использованием магнитной памяти металла". Доклады и тезисы докладов. Москва: Энергодиагностика, 1999.

*А.А.Дубов.* Диагностика котельных труб с использованием магнитной памяти металла. Москва: Энергоатомиздат, 1995.

*А.А.Дубов.* Диагностика турбинного оборудования с использованием магнитной памяти металла. Москва: Энергодиагностика, 1999.

*А.А.Дубов.* Диагностика трубопроводов, оборудования и конструкций с использованием магнитной памяти металла. Сборник статей и докладов. Москва: Энергодиагностика, 1999.

*А.А.Дубов.* Исследование свойств металла с использованием метода магнитной памяти // Металловедение и термическая обработка, №9, 1997.

*А.А.Дубов.* Экспресс-метод контроля сварочных напряжений // Сварочное производство, №11, 1996.

*А.А.Дубов.* Диагностика усталостных повреждений рельс с использованием магнитной памяти металла // В мире неразрушающего контроля, №5, 1999.

## 7.4. Диагностика энергетических объектов

### 7.4.1. Диагностика трубопроводов

На рис.7.4.1 показана схема контроля трубопровода с использованием специализированного магнитометрического прибора — измерителя концентрации напряжений *ИКН-1М*. Прибор имеет экран, блок памяти для регистрации результатов измерений и сканирующее устройство в виде тележки, на которой смонтированы датчики измерений магнитного поля  $H_p$  и длины трубопроводов. Контроль не требует предварительной подготовки поверхности. В отдельных случаях контроль трубопроводов может осуществляться без снятия изоляции.

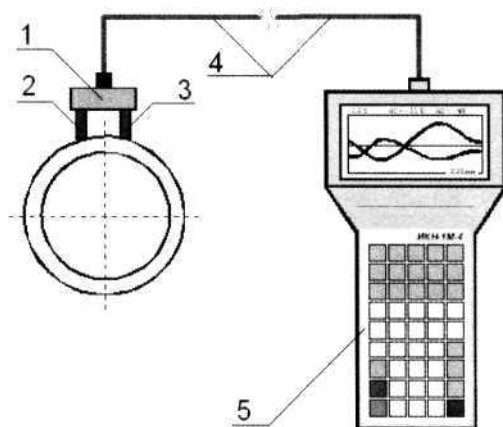


Рис.7.4.1. Схема контроля газопровода двухканальным датчиком: 1 — сканирующее устройство с датчиком измерения длины; 2, 3 — феррозондовые датчики; 4 — соединительный кабель; 5 — прибор *ИКН-1М* с блоком памяти и экраном для отображения графической информации

На рис.7.4.2,а показан фрагмент напряженно-деформированного состояния трубопровода по результатам измерения поля остаточной намагниченности  $H_p$  вдоль верхней образующей трубопровода. На рис.2, б представлено расположение линии смены знака поля  $H_p$  (линии КН) на участке трубопровода между сечениями I-I и II-II.

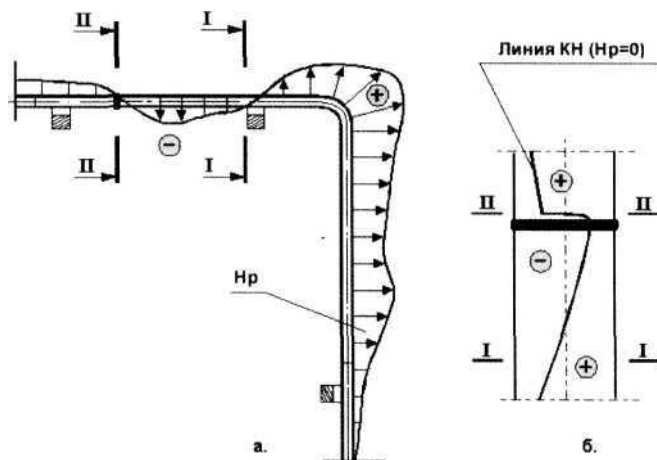
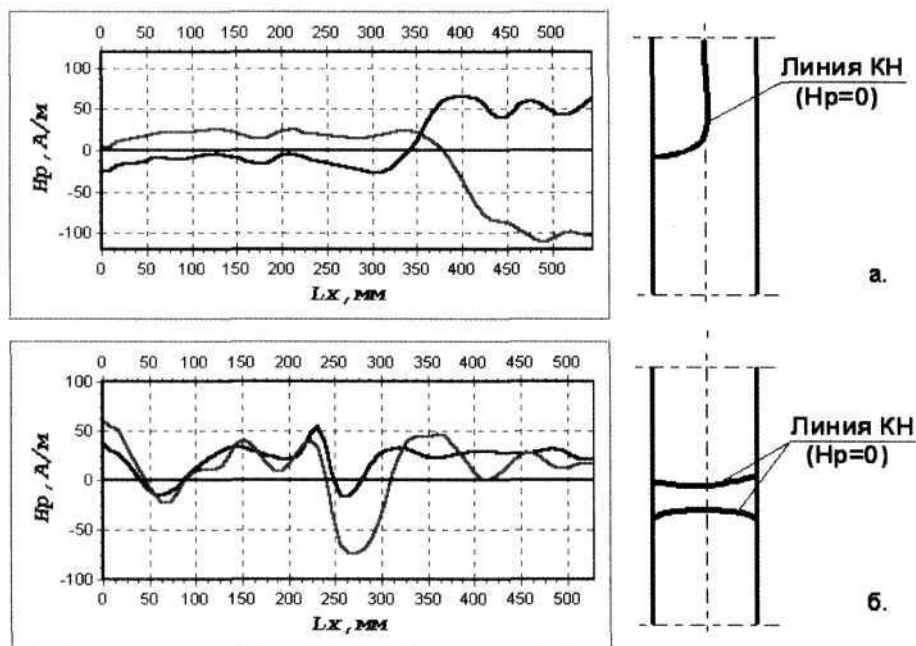


Рис. 7.4.3.

На рис.7.4.3 представлены примеры распределения поля  $H_r$ , полученные при контроле участков трубопровода одновременно по двум каналам измерений. На рис.3,а показан пример распределения поля  $H_r$  при расположении линии КН продольно оси трубопровода. На рис.7.4.3,б показан пример распределения поля  $H_r$  при расположении линий КН поперечно оси трубопровода.



На рис.7.4.4,а показана схема контроля вдоль периметра сварного шва трубопровода.

На рис.7.4.4,б показан пример распределения поля Нр, характеризующий удовлетворительное состояние сварного шва.

На рис.7.4.4,в — пример распределения поля, характеризующий неудовлетворительное его состояние с зонами КН и развивающимися дефектами в этих зонах.

Предлагаемый способ диагностики может быть использован для трубопроводов любых типоразмеров из ферромагнитных сталей и в отдельных случаях из аустенитных сталей.

Конкретные методики контроля гибов, сварных соединений и прямых участков трубопроводов согласованы с инспекцией Госгортехнадзора РФ (с управлениями Котлонадзора, нефтеперерабатывающей, химической, нефтехимической, нефтяной и газовой промышленности), РАО "ЕЭС России", РАО "Газпром". Методика и соответствующие приборы позволяют осуществлять одновременно с дефектоскопией контроль напряжённо-деформированного состояния (под нагрузкой или после её снятия). На основе первичного 100% обследования трубопровода с использованием ММП представляется возможным в дальнейшем контролировать только наиболее напряжённые, предрасположенные к повреждению участки. На этих участках можно выполнить съёмную изоляцию и в дальнейшем их периодически контролировать.

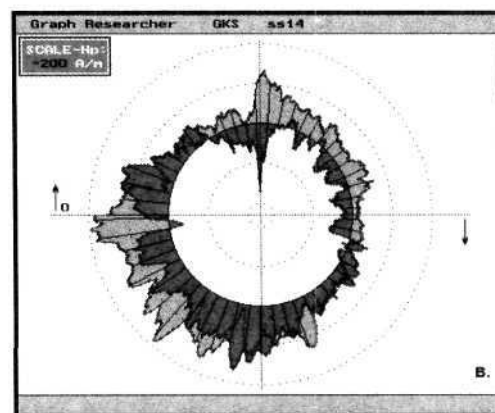
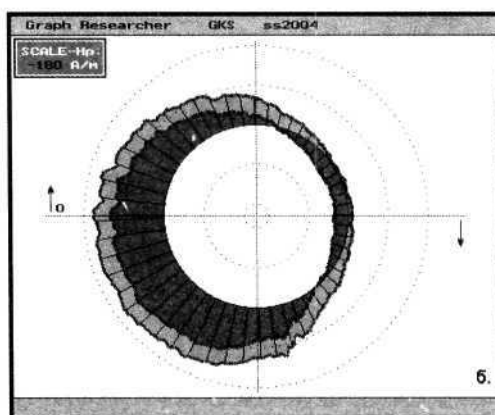


Рис.7.4.4.

### 7.4.2. Экспресс-метод контроля сосудов и аппаратов

Схема контроля представлена на рис.7.4.5. Сканирующее устройство в виде тележки перемещается оператором вдоль сварных соединений и по образующим сосуда в соответствии с методикой.

На рис.7.4.6,а представлен фрагмент по результатам контроля участка сварного соединения, находящегося в удовлетворительном состоянии, на рис.7.4.6,б — фрагмент участка с трещиной.

На рис.7.4.7 показано расположение линий концентрации напряжений (линий КН), выявленных при контроле методом магнитной памяти металла. Линии КН в данном случае образовались в результате потери устойчивости сосуда. Как правило, по линии КН на внутренней поверхности сосуда имеет место коррозионно-усталостный износ металла. На наружной поверхности по линии КН может образоваться трещина усталостного (или коррозионно-усталостного) характера.

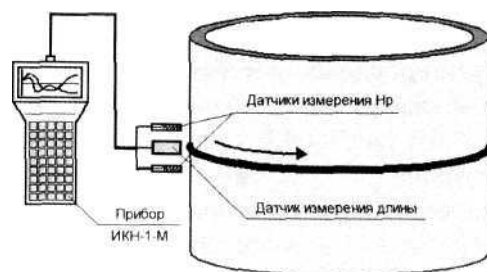


Рис.7.4.5



Рис.7.4.7.

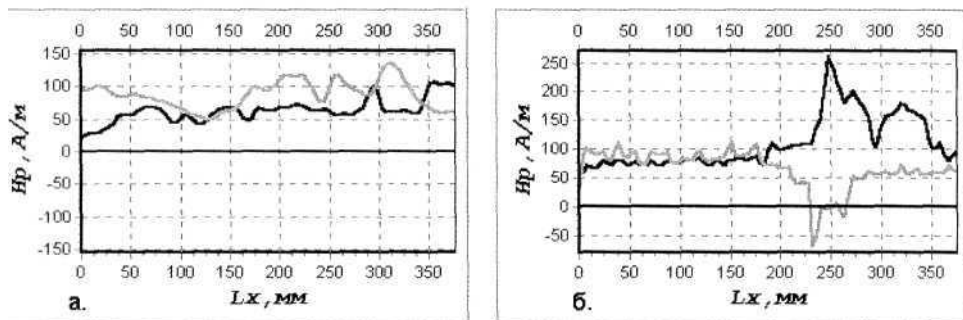


Рис.7.4.6.



В январе 1996 г. Госгортехнадзором России утверждена "Методика экспресс-диагностики сосудов и аппаратов с использованием магнитной памяти металла".

Данная методика может применяться в энергетике, химической, нефтегазоперерабатывающей, нефтехимической, нефтяной и газовой отраслях промышленности, при контроле сосудов из ферромагнитного и парамагнитного (аустенитного) материала. Методика и соответствующие приборы позволяют осуществлять одновременно с дефектоскопией сварных швов контроль напряжённо-деформированного состояния сосуда (под нагрузкой или после её снятия). Методика позволяет также выполнять контроль "уторных" сварных швов, представляющих проблему для традиционных методов НК.

На основе первичного 100% обследования сосуда с использованием ММП представляется возможным в дальнейшем контролировать только наиболее напряжённые, предрасположенные к повреждениям зоны. В этих зонах с точностью до 1 мм можно установить датчики эксплуатационного контроля методом акустической эмиссии.

В зонах КН, выявленных ММП, представляется возможным сделать упрочнение обечайки сосуда, не дожидаясь развития повреждения.

### 7.4.3. Диагностика труб и поверхностей нагрева энергетических и водогрейных котлов

Контроль выполняется на остановленном в ремонте котле. На рис.7.4.8 показана схема контроля экранных труб с использованием специализированного магнитометрического прибора — измерителя концентрации напряжений (*ИКН-1М*).

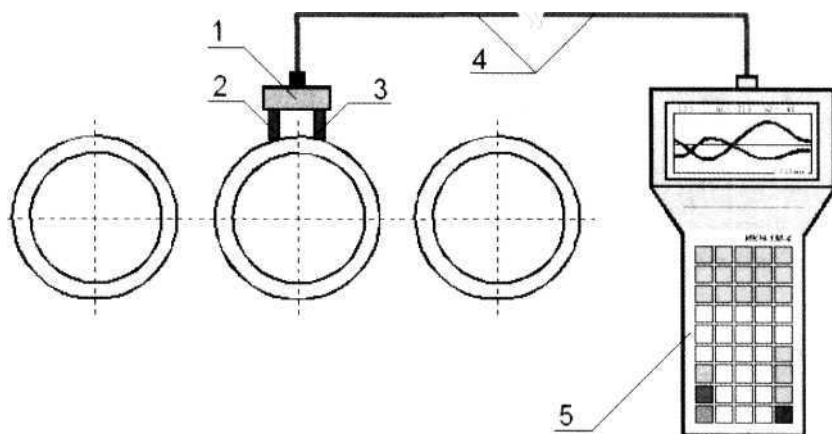


Рис.7.4.8. Схема контроля экранных труб с использованием двухканального датчика: 1,2 — феррозондовые датчики; 3 — сканирующее устройство с датчиком измерения длины; 4 — соединительный кабель; 5 — прибор *ИКН-1М*.

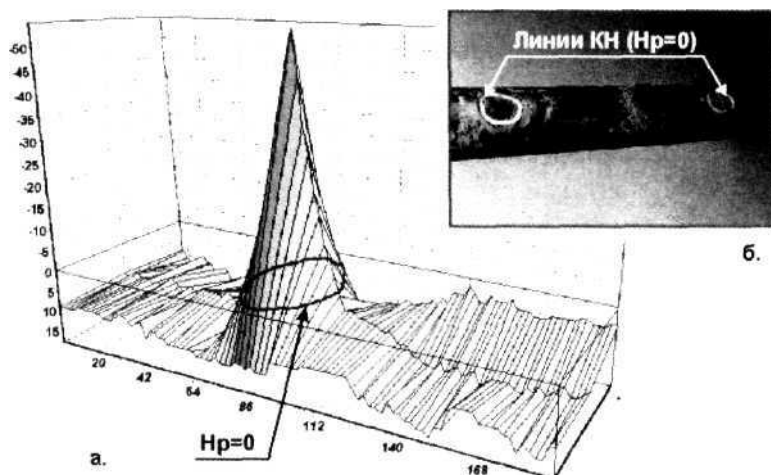


Рис.7.4.9.

На рис.7.4.9, а показан фрагмент результатов контроля в зоне КН на экранной трубе газоплотной панели топки котла. На рис.2,б показано характерное повреждение экранной трубы газоплотной панели.

На рис.7.4.10 представлен фрагмент определения язвы коррозии по характеру распределения поля остаточной намагниченности  $H_p$  вдоль огневой образующей трубы.

Предлагаемый метод диагностики позволяет без зачистки металла производить массовый контроль сварных стыков на трубах ПН и в узлах стыковки труб и змеевиков с коллекторами. Метод можно эффективно использовать для определения зон КН на трубах пароперегревателя, изготовленных из перлит-

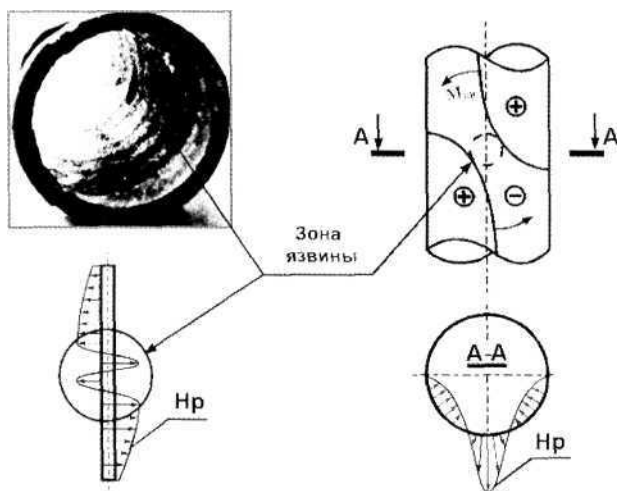


Рис.7.4.10.

ных и аустенитных марок сталей. По результатам контроля с использованием метода магнитной памяти представляется возможным производить вырезку представительных образцов труб для анализа состояния металла, определения количества и качества внутренних отложений. Метод позволяет выполнять одновременно дефектоскопию и диагностику с выявлением причин образования зон КН и повреждений.

Разработанный способ диагностики относится к экспресс-методам и позволяет в течении 5-6 рабочих дней проконтролировать все трубы топочной камеры котла большой мощности.

Утверждены РАО "ЕЭС России" и согласованы с Госгортехнадзором РФ "Методические указания по техническому диагностированию труб поверхностей нагрева паровых и водогрейных котлов с использованием магнитной памяти металла" (РД 34.17.446-97). Данный руководящий документ обязателен для применения на предприятиях отрасли "Электроэнергетика" и может быть использован на предприятиях других отраслей, являющихся владельцами котлов подконтрольных Госгортехнадзору России.

#### **7.4.4. Диагностика гибов котельных и паропроводных труб**

Одной из сложных проблем энергетики является обеспечение надежности гибов необогреваемых труб котлов и паропроводов. Несмотря на большое количество исследований и мероприятий, выполненных в масштабе отрасли "Электроэнергетика" с целью повышения надежности гибов, желаемые результаты до сих пор не достигнуты и гибы необогреваемых труб котлов продолжают оставаться аварийным узлом. Разработана методика раннего обнаружения повреждений гибов с использованием эффекта магнитной памяти металла. Существующие методы неразрушающего контроля (УЗК, МПД), которые широко применяются в энергетике, направлены на поиск и обнаружение уже развитых дефектов и различного рода трещин в металле оборудования, что является недостаточным, если рассматривать проблему обеспечения надежности гибов трубопроводов с точки зрения обеспечения безопасности обслуживающего персонала.

Вместе с тем известно, что основным источником разрушений гибов является концентрация механических напряжений, обусловленная действием рабочих нагрузок. Как правило, повреждаются гибы, работающие в условиях дополнительных (не расчетных) напряжений.

Из теории прочности и механики разрушений, известно, что наиболее неблагоприятным для развития повреждений оборудования является такое сочетание нагрузок, при котором металл локально находится под воздействием главных растягивающих напряжений. При этом зарождение трещин происходит по плоскостям, перпендикулярным главным растягивающим напряжениям. Многолетний опыт исследования магнитных полей на котельных и паропроводных трубах выявил наличие устойчивых линий смены знака нормальной составляющей напряженности магнитного поля  $H_r$  в зонах развивающихся

ся повреждений металла. Именно этот диагностический параметр (линия  $H_p=0$ ) был положен в основу методики контроля гибов. Интерпретация этого диагностического магнитного параметра, как линии главных напряжений, возникающей на поверхности труб под действием рабочих нагрузок, дана в специальной работе. Очевидно, что совпадение линий  $H_p=0$  с растянутой или нейтральной зонамигиба трубы является наиболее опасным для его надежности.

Рассмотрим на примере контроля одного из гибов пароперепускных труб турбины ПТ-60 ст.№3 Дягилевской ТЭЦ (гиб №10, ст.15Х1МФ,  $\varnothing 273 \times 32$  мм).

Контроль был выполнен с использованием двухканального датчика прибора ИКН-1М вдоль растянутой стороныгиба. На рис.7.4.11, а приведена эпюра распределения поля  $H_p$ , зафиксированная в двухканальном режиме. Как видно из рис.7.4.11,а, зона концентрации напряжений (КН) характеризуется резким скачкообразным изменением поля  $H_p$ . Следует отметить, что сканирование вдоль растянутой зоныгиба выполнялось с базовым расстоянием между феррозондовыми датчиками, равным 20 мм. При этом резкое изменение поля  $H_p$  было зафиксировано в основном по одному каналу измерений. Затем в сечениигиба, где было зафиксировано резкое изменение поля  $H_p$ , был выполнен контроль вдоль периметрагиба.

На рис.7.4.11,б показано распределение поля  $H_p$ , зафиксированное вдоль периметрагиба (сечение А-А). Расстояние между феррозондовыми датчиками было также 20 мм. Из рис. 1,б видно, что по одному из каналов зафиксировано значительное изменение величины и знака поля  $H_p$ , по другому каналу - изменение поля  $H_p$  менее значительное по величине и без изменения знака.

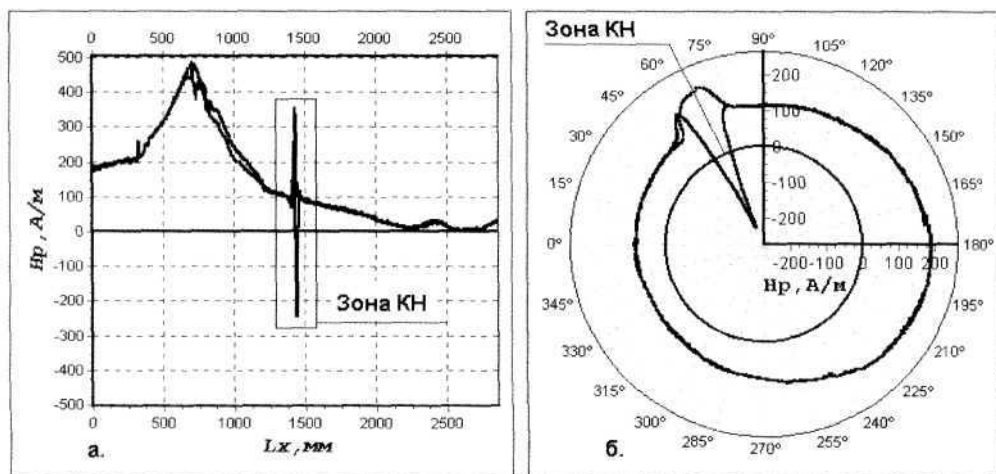


Рис.7.4.11

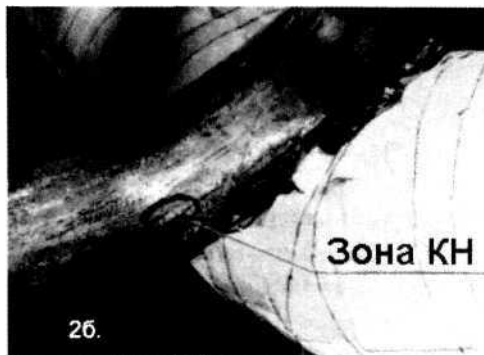
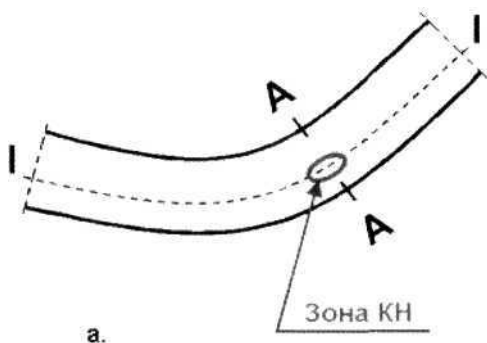


Рис.7.4.12

На рис.7.4.12,а показана зона КН, выявленная на гيبة №10 вблизи растянутой стороны. Зона КН представляет собой пятно в виде эллипса с размерами 70х35 мм, т.е. кратному толщине стенки (32 мм). Пятно ограничено линией смены знака поля  $H_p$  (линией  $H_p=0$ ). На рис.7.4.12,б показан фрагмент, иллюстрирующий заземление гيبة №10 (с зоной КН) с трубой промотбора этой же турбины №3. Очевидно, что именно заземление гيبة №10 при его температурной компенсации явилось причиной образования зоны КН.



Рис.7.4.13.

На рис.7.4.13 приведена структура металла, полученная с реплики, взятой из зоны КН (по линии  $H_p=0$ ) на гيبة №10.

Как видно из рис.3, на данном гيبة в зоне КН в структуре металла выявлены трещины с расстоянием между ними примерно 0,1 мм. Таким образом, гيبة №10 находился в состоянии предразрушения.

Представленная методика контроля гибов была согласованна с Главтехуправлением Минэнерго 25.02.1991г. и с Госгортехнадзором РФ 26.02.1993г., прошла промышленное опробование на ряде электростанций России и в других странах. Накоплен значительный положительный опыт, свидетельствующий об эффективности контроля гибов с использованием ММП в сочетании с УЗК и с анализом структуры металла, полученной с реплик, взятых из зон КН. В настоящее время данная методика рассматривается РАО "ЕЭС России" с целью ее включения в новую "Инструкцию по дефектоскопическому контролю гибов и трубопроводов".

### **7.4.5. Экспресс-метод неразрушающего контроля качества сварных соединений**

Качество сварных соединений определяется комплексом показателей, включающих параметры напряжённо-деформированного состояния (НДС), структурно-механической неоднородности (СМН) и дефектности.

Основной проблемой неразрушающего контроля (НК) сварных соединений при эксплуатации является определение мест совпадения дефектов сплошности металла с концентрацией сварочных напряжений и максимальных напряжений от рабочих нагрузок. На сегодня не существует ни одного метода НК для оперативного контроля качества сварных соединений разных типов, позволяющего без специальной подготовки поверхности и без сложной настройки аппаратуры определять зоны концентрации напряжений (КН) в комплексном сочетании "дефект -- напряжения", что не позволяет объективно оценить степень опасности дефекта.

В этой связи метод магнитной памяти металла (ММП) представляет большие практические возможности, прежде всего, как инженерный метод экспресс контроля качества и как интегральный метод комплексной оценки качества сварных соединений. При контроле качества любых типов сварных соединений с использованием ММП можно оперативно определять:

- степень неоднородности напряженно-деформированного состояния при аттестации, выборе, оптимизации и сертификации технологий сварки;
- количество зон КН и их потенциальную опасность;
- необходимость и качество (эффективность) термообработки;
- уровень остаточных напряжений в зонах КН;
- объёмы и методы проведения штатной дефектоскопии;
- степень "засорённости" сварных швов дефектами.

Имеется опыт применения нового метода экспресс контроля сварочных деформаций и напряжений на протяжных сварных конструкциях. В течение часа с помощью портативных специализированных приборов с регистрирующим устройством можно проконтролировать до 500 м сварных швов. На 50-м конгрессе международного института сварки (МИС), который состоялся в июле 1997 г. в г.Сан-Франциско (США), метод магнитной памяти получил признание, и получена рекомендация МИС об его использовании для оценки напряжённо-деформированного состояния оборудования и сварных соединений. Утверждена международная программа "Round Robin" по проверке эффективности ММП при контроле остаточных напряжений в сравнении с другими методами НК.

На рис.7.4.14 показана схема экспресс контроля методом магнитной памяти сварного соединения.

На рис.7.4.15 приведены примеры контроля качества кольцевых сварных швов на конверторе аммиака АО "Невинномысский Азот". Толщина стенки конвертора 200 мм, диаметр 1550 мм. Контроль проводили в рабочем состоянии ( $P=240\text{ атм.}$ ,  $T=330^\circ\text{C}$ ). На рис.7.4.15,а установлено хорошее качество свар-



Рис.7.4.14

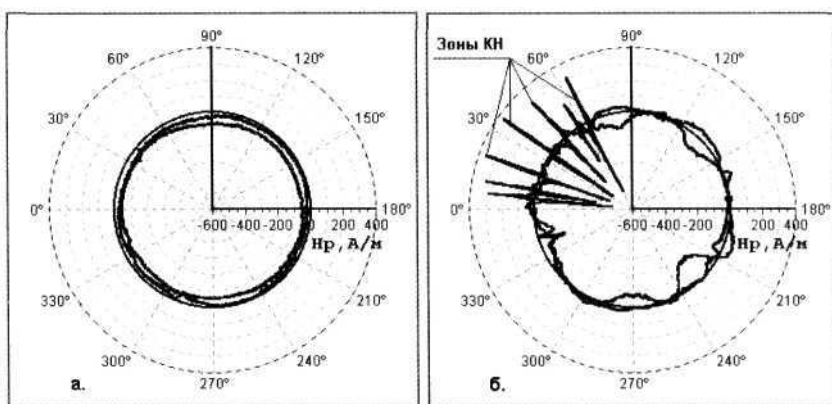


Рис.7.4.15

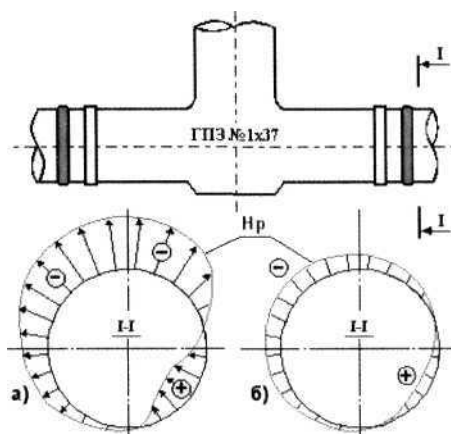


Рис.7.4.16

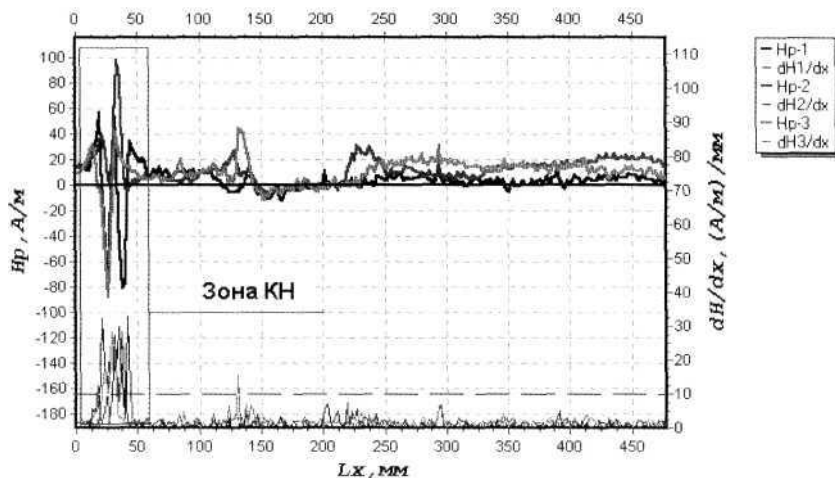


Рис.7.4.17

ного соединения, а рис.7.4.15,б характеризует его неудовлетворительное качество с зонами образования поперечных трещин (9-12 часов) и отдельными зонами КН с развивающимися повреждениями на глубине 200 мм.

На рис.7.4.16 показано применение ММП для контроля эффективности термообработки сварного соединения после сварки задвижки и паропровода в сечении I-I. Контроль проводили по зоне термического влияния сварного шва. Результаты контроля, представленные на рис.7.4.16,б, свидетельствуют о заметном снижении уровня остаточных напряжений после высокотемпературного отпуска сварного соединения по сравнению с исходным состоянием (рис.7.4.16,а).

На рис.7.4.17 показана зона максимальной КН, выявленная ММП на кольцевом сварном шве резервуара хранения водорода. При дополнительном контроле УЗД в этой зоне обнаружены недопустимые дефекты.

Рис.7.4.18 представляет результаты измерения нормальной составляющей поля остаточной намагненности, характеризующей распределение остаточных напряжений и деформаций после сварки стыкового шва пластин. Пластины при сварке находились в свободном состоянии. Из рис.7.4.18 видно влияние корб-

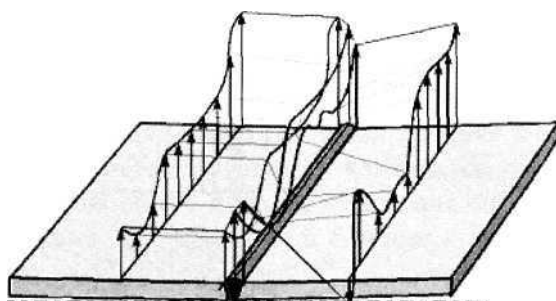


Рис.7.4.18.



ления пластин при сварке на распределение в них остаточных сварочных напряжений и деформаций.

#### **7.4.6. Контроль качества технологий восстановления, наплавов, напыления**

Контроль качества современных технологий восстановления, наплавов и напылений изношенных узлов и деталей энергооборудования невозможно обеспечить без контроля состояния металла до и после выполнения указанных технологий. Используемые для этой цели традиционные методы (выборочное измерение твердости, металлографическое исследование поверхностного слоя) по своим возможностям не могут обеспечить полного и надежного контроля состояния металла. Проблемы контроля металла возникают при сварочно-термических технологиях ремонта и восстановительных термических обработках (в том числе и высокотемпературных) сварных соединений коллекторов, паропроводов, корпусных деталей, барабанов, рабочих лопаток паровых турбин и других узлов.

Решить указанную проблему контроля состояния металла и, соответственно, качества восстановительных технологий представляется возможным с использованием нового метода неразрушающего контроля, основанного на использовании эффекта магнитной памяти металла.

В ходе промышленных и лабораторных исследований установлено, что любой вид восстановительной технологии нецелесообразно выполнять, если в структуре металла ремонтируемого узла произошли необратимые изменения, и этот узел находится в состоянии предразрушения.

Метод магнитной памяти металла (ММП), отображающий структурную и технологическую наследственность изделия, и соответствующие приборы контроля, не требующие подготовительных работ, позволяют обеспечить 100% экспресс-контроль всей поверхности и выявить узлы и детали, на которых выполнять восстановительную технологию нецелесообразно.

Контроль состояния металла с использованием ММП на узлах и деталях энергооборудования до и после выполнения на них восстановительных технологий ремонта позволяет оценить качество этих технологий, структурные изменения, уровень и распределение остаточных напряжений.

Методики и приборы контроля, основанные на использовании магнитной памяти металла, аттестованы в России и проходят аттестацию в Германии по европейскому уровню стандартизации, их можно приобрести на предприятии "Энергодиагностика" (г.Москва).

**Руководящие документы и методики контроля с использованием ММП.**

РД 34.17.437-95. Неразрушающий магнитный метод диагностирования сварных соединений трубных систем котлов и трубопроводов энергетических установок.

РД 34.17.446-97. Методические указания по техническому диагностированию труб поверхностей нагрева паровых и водогрейных котлов с использованием магнитной памяти металла.

РД 51-1-98. Методика оперативной компьютерной диагностики локальных участков газопроводов с использованием магнитной памяти металла.

## 7.5. Приборы и технические средства метода магнитной памяти металла

### Измеритель концентрации напряжений магнитометрический — "ИКНМ-2ФП"

Прибор ИКНМ-2ФП представляет собой упрощённый вариант прибора *ИКН-1М*. Он имеет цифровую индикацию измеряемых данных без регистрации, имеет блок памяти с возможностью записи до 1000 измерений. Прибор предназначен для определения зон КН при экспресс-контроле малогабаритных изделий и узлов оборудования (в том числе в труднодоступных местах).



| Технические характеристики                  |                        |
|---------------------------------------------|------------------------|
| Диапазон измерения величины $H_p$           | $\pm 2000 \text{ А/м}$ |
| Погрешность измерения (не более)            | 5%                     |
| Количество каналов измерения величины $H_p$ | 2                      |
| Время одного измерения (не более)           | 0,1 с                  |
| Питание от аккумуляторов                    | DC 2,4В=2x1,2В         |

|                                   |              |
|-----------------------------------|--------------|
| Потребляемая мощность (не более)  | 0,4 ВхА      |
| Рабочий температурный диапазон    | -20°C +60°C  |
| Диапазон относительной влажности  | 45%-80%      |
| Габаритные размеры                | 120х60х25 мм |
| Вес (с аккумуляторными батареями) | 0,25 кг      |

### Измеритель концентрации напряжений магнитометрический — "ИКНМ-2ФП"

Прибор ИКНМ-2ФП представляет собой упрощённый вариант прибора *ИКН-1М*. Он имеет цифровую индикацию измеряемых данных без регистрации, имеет блок памяти с возможностью записи до 1000 измерений. Прибор предназначен для определения зон КН при экспресс-контроле малогабаритных изделий и узлов оборудования (в том числе в труднодоступных местах).



| Технические характеристики                  |                      |
|---------------------------------------------|----------------------|
| Диапазон измерения величины $H_p$           | $\pm 2000\text{А/м}$ |
| Погрешность измерения (не более)            | 5%                   |
| Количество каналов измерения величины $H_p$ | 2                    |
| Время одного измерения (не более)           | 0,1 с                |
| Питание от аккумуляторов                    | DC 2,4В=2х1,2В       |
| Потребляемая мощность (не более)            | 0,4 ВхА              |

|                                   |              |
|-----------------------------------|--------------|
| Рабочий температурный диапазон    | -20°C +60°C  |
| Диапазон относительной влажности  | 45%-80%      |
| Габаритные размеры                | 120x60x25 мм |
| Вес (с аккумуляторными батареями) | 0,25 кг      |

## Электромагнитные индикаторы трещин "ЭМИТ-1" и "ЭМИТ-2"

Приборы ЭМИТ-1 и ЭМИТ-2 предназначены для выявления дефектов в виде поверхностных трещин в магнитных и немагнитных металлах. Принцип действия приборов основан на измерении магнитного поля рассеяния в зоне трещин.

Приборы малогабаритны, имеют автономное питание, износостойчивые датчики, просты в работе и настройке. Настройка приборов производится автоматически: необходимо лишь установить датчик на контролируемую поверхность, нажать кнопку настройки, и через долю секунды прибор готов к работе.

В работе при пересечении датчиком трещины приборы ЭМИТ-1 и ЭМИТ-2 выдают соответствующий звуковой и световой сигнал, а по показаниям на светодиодной шкале приборов можно судить о размерах трещины.



ЭМИТ-1 и ЭМИТ-2 имеют ряд преимуществ над традиционными вихревыми приборами:

- не требуют зачистки контролируемой поверхности или какой-либо её подготовки;
- определяют трещины через слой краски, изоляции толщиной до 2мм;
- способны работать на грубых, повреждённых коррозией поверхностях;
- определяют трещины в условиях неоднородной структуры металла, например, в зоне сварных швов;
- отсутствуют "краевые эффекты".

Отличия ЭМИТ-1 и ЭМИТ-2:

ЭМИТ-1 имеет анизотропный датчик в виде "отвёртки", предназначен для контроля трещин длиной более 5 мм известного направления. Этот прибор

эффективно использовать в сочетании с приборами *ИКН-1М* и *ИКНМ-2ФП* после выявления линий КН — потенциальных трещин.

ЭМИТ-2 имеет "карандашный" датчик, по сравнению с прибором ЭМИТ-1, лучше реагирует на раскрытие трещин, а минимальная длина трещин 1 мм (у ЭМИТ-1 минимальная длина трещин 5 мм).

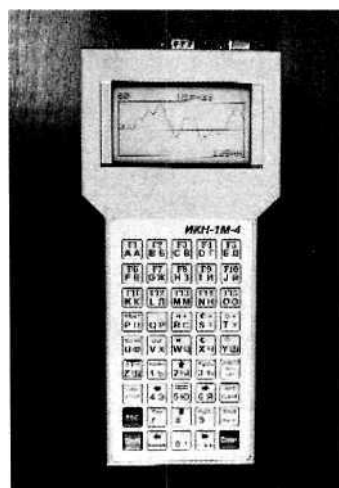
| Технические характеристики                                      |                |              |
|-----------------------------------------------------------------|----------------|--------------|
| Диапазон индикации трещин для магнитных и немагнитных металлов: | Глубина        | более 0,3 мм |
|                                                                 | Длина          | более 5 мм   |
|                                                                 | Ширина         | более 0,01мм |
| Максимальная скорость сканирования                              | 0,5м/с         |              |
| Питание от аккумуляторов                                        | DC 3,6В=3x1,2В |              |
| Время непрерывной работы (не менее)                             | 12 часов       |              |
| Рабочий температурный диапазон                                  | -20С +60С      |              |
| Диапазон относительной влажности                                | 45 % — 80%     |              |
| Габаритные размеры                                              | 160x85x30 мм   |              |
| Вес                                                             | 0,35 кг        |              |

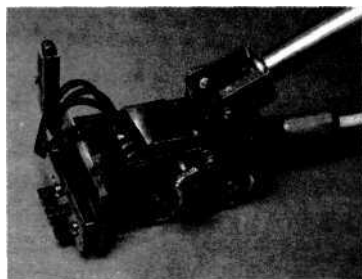
### **Прибор магнитометрический для определения концентрации напряжений (измеритель концентрации напряжений) — "ИКН-1М"**

ИКН-1М - - система измерения, регистрации и обработки данных диагностики напряженно-деформированного состояния оборудования и конструкций с использованием метода магнитной памяти металла. Прибор аттестован в Госстандарте РФ.

К достоинствам прибора ИКН-1М можно отнести следующее:

- не требуется специального намагничивания контролируемых объектов, так как исполь-





зуется остаточная намагниченность, сформировавшаяся в процессе эксплуатации;

- не требуется какой-либо подготовки контролируемой поверхности;

- прибор имеет возможность записи параметров контроля с заданной частотой в единицу времени, что позволяет выполнять измерения без сканирования по объекту

контроля (например, при вращении колёс относительно жёсткозакреплённых датчиков);

- прибор имеет возможность записи данных в энергонезависимую память и сброса их на IBM PC;

- прибор имеет возможность распечатки графиков на принтере;

- ёмкость энергонезависимой памяти 2(4)Мб;

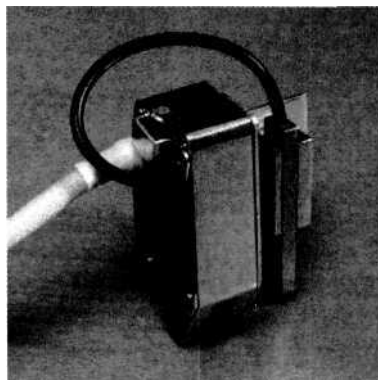
- в комплекте с прибором поставляется программный продукт "ММП-Система" для углубленной обработки данных на IBM PC.

| Технические характеристики                     |                |
|------------------------------------------------|----------------|
| Диапазон измерения величины $H_p$              | $\pm 2000$ А/м |
| Количество каналов измерения величины $H_p$    | 2(4)           |
| Минимальный (максимальный) шаг измерения       | 1 (128) мм     |
| Максимальная скорость сканирования (шаг 1 мм)  | 0,2 (0,5) м/с  |
| Микропроцессор                                 | 8 бит          |
| Ёмкость оперативной памяти                     | 128 Кб         |
| Ёмкость энергонезависимой памяти               | 2 (4) Мб       |
| Жидкокристаллический графический индикатор     | 128х64 точки   |
| Скорость передачи данных на IBM PC через RS232 | 115 кбод       |
| Питание от аккумуляторов                       | DC 4,8В=4х1,2В |
| Потребляемая мощность                          | 0,8-2,2 ВхА    |
| Рабочий температурный диапазон                 | -20°C...+60°C  |
| Диапазон относительной влажности               | 45% — 80%      |
| Габаритные размеры                             | 230х105х40 мм  |
| Вес (с аккумуляторными батареями)              | 0,5 кг         |

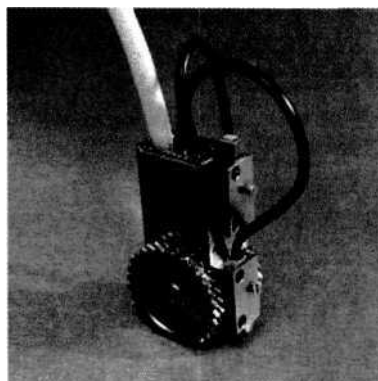
## Сканирующие устройства для измерителя концентрации напряжений "ИКН-1М"

Для контроля различного оборудования разработаны 5 типов специализированных датчиков:

Тип1 - - предназначен для контроля трубопроводов, сосудов, протяжённых сварных соединений. Изготовлен в виде "тележки" на четырёх колёсах, имеющей 2-4 феррозондовых преобразователя и счётчик длины. При использовании со специализированной штангой можно осуществлять контроль на расстоянии 2-5 м от объектов. При установке специализированных накладок датчик может использоваться для контроля рельсового пути.



Тип2 — предназначен для контроля малогабаритных изделий (лопаток, шпилек, зубчатых пар). Изготовлен в самом малом корпусе с одним колесиком. Имеет 2 феррозондовых преобразователя и счётчик длины.

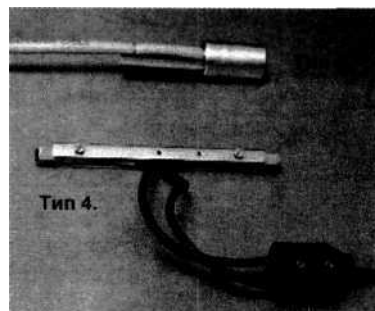


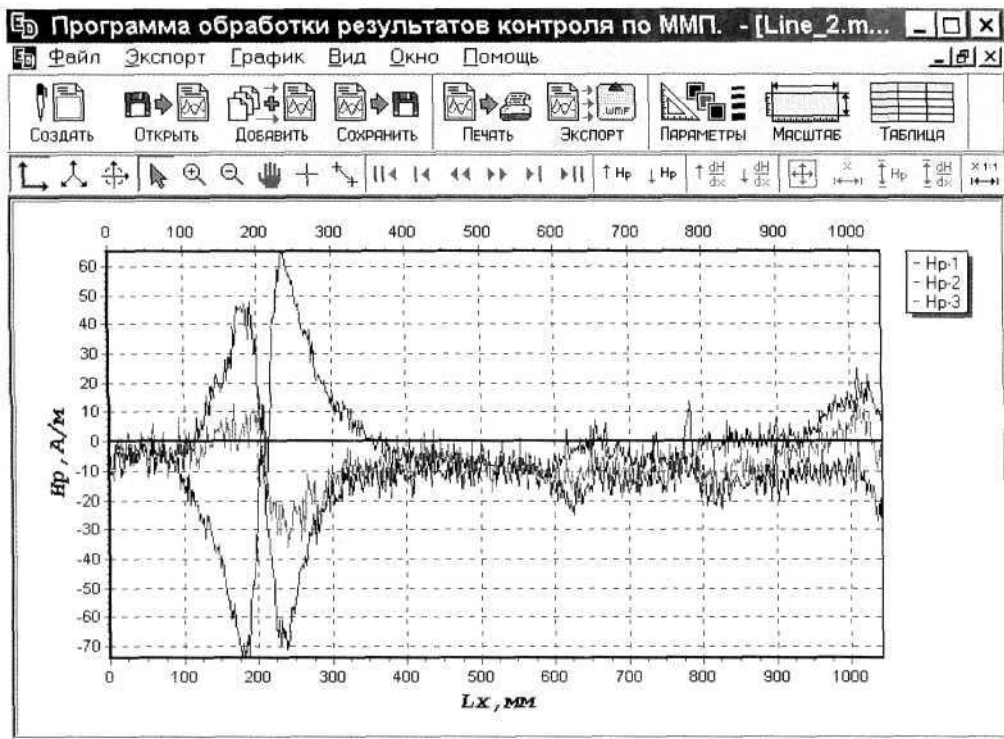
Тип 3 — предназначен для контроля малогабаритных изделий, а также для контроля внутри трубопроводов и каналов роторов турбин. Изготовлен в малом корпусе с двумя колесиками. Имеет 2 феррозондовых преобразователя и счётчик длины.

Тип4 - - предназначен для контроля в труднодоступных местах (контроль без регистрации длины).

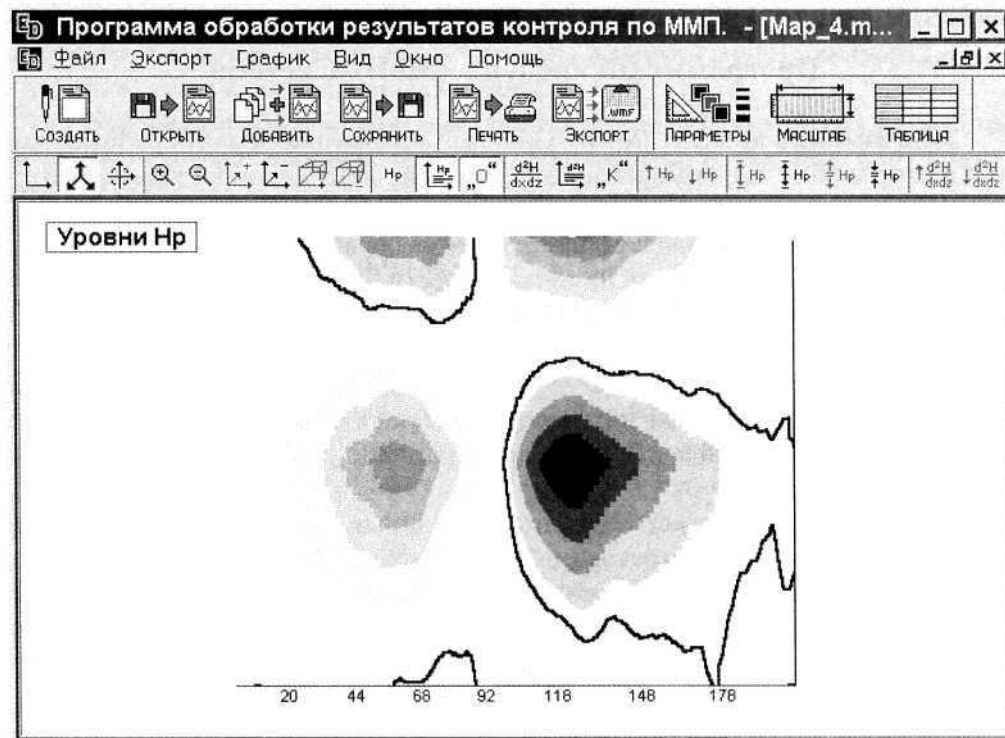
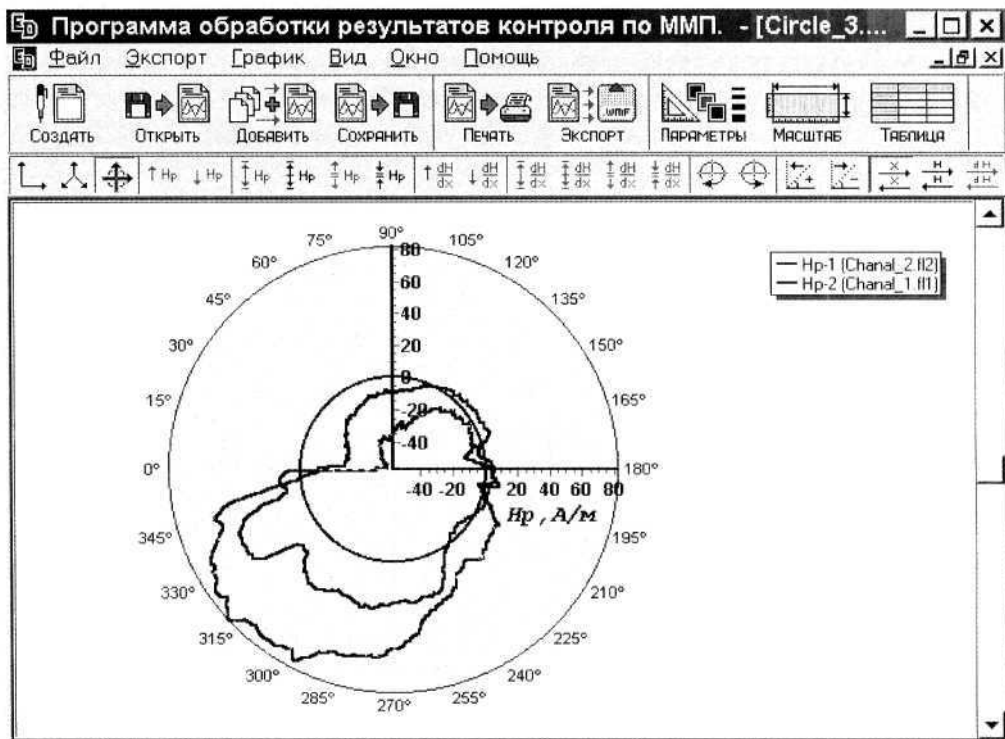
Тип5 — предназначен для внутритрубной диагностики (для трубок теплообменников, осевых каналов роторов турбин и т.д.).

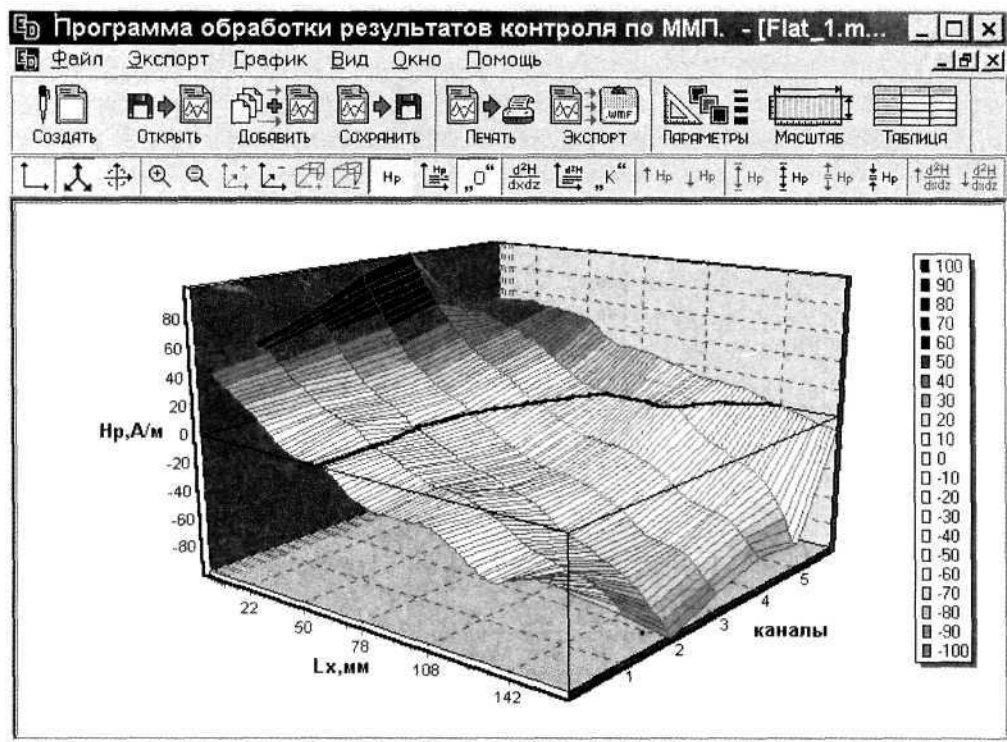
Все датчики имеют возможность работы в режиме отстройки от магнитного поля Земли. Прибор ИКН-1М имеет возможность автоматической настройки и калибровки датчиков.











## Программный продукт "ММП-Система"

Программный продукт "ММП-Система" предназначен для обработки данных о напряжённо-деформированном состоянии деталей, оборудования и конструкций по методу магнитной памяти металла.

"ММП-Система" позволяет одновременно обрабатывать несколько графиков распределения остаточной намагниченности. Имеется возможность управления параметрами графика. По графикам распределения остаточной намагниченности ( $H_r$ -графикам) программа может автоматически построить графики дифференциала функции  $H_r$  ( $Dx$ -графики), характеризующие уровень концентрации напряжений, и по ним, в соответствии с методикой контроля, определить зоны предельной концентрации напряжений (зоны развития повреждений).

"ММП-Система" может обрабатывать данные, полученные в результате работы с приборами-регистраторами (например, *ИКН-1М*), после их сброса на компьютер, а также данные, непосредственно введённые с клавиатуры компьютера (при работе с прибором типа *ИКНМ-2ФП*). В программе предусмотрена возможность редактирования данных. При желании пользователь может распечатать график на принтере или осуществить запись файла в форматах (\*.bmp; \*.wmf; \*.emf) для дальнейшей обработки с помощью других программ (например, MS Word).

## 7.6. Методы магнитопорошковой дефектоскопии

Известно что, мелкие железные опилки прилипают к намагниченному листу металла, при этом больше всего опилок скапливается по срезу металла, по контуру разреза или отверстия. Много меньше опилок распределяется по ровной "бездефектной" поверхности намагниченного листа.

Этот принцип и используется в магнитопорошковой дефектоскопии. Контролируемый участок намагничивают сильным магнитом и наносят на него мелкую ферромагнитную пыль. Чтобы ярче получалась картина, сначала участок красят белой краской — на ее фоне черные опилки отчетливее видны. А чтобы проявились самые мелкие дефекты, используют не опилки, а очень мелкую ферромагнитную пыль. Чтобы эта пыль была поподвижнее и быстрее скапливалась на дефектах, ее предварительно разводят в быстроиспаряющейся жидкости.

В результате, как только взвесь магнитной пыли попадает на намагниченную поверхность конструкции, частички быстро скапливаются на контурах дефектов, а на "бездефектных" участках их почти не остается. "Бездефектные" участки становятся светлым, почти белым фоном для черных скоплений магнитных частичек. Место и контур дефекта "проявляется".

Все бы хорошо, но:

- На результат магнитопорошковой дефектоскопии чрезвычайно влияет состояние поверхностного слоя металла ("зоны наклепа"), где напряжения превышают напряжения основного металла в тысячи раз. Из-за этого появляется "фон" из нераспределенных частичек.

- Неравномерность магнитных свойств металла (даже не связанная с дефектами) искажает картину. Появляется множество случайных мест скоплений магнитных частичек, которые трудно объяснить — это "ложная тревога". А сами дефекты как бы маскируются таким случайным фоном.

- Если же дефект не имеет выхода на поверхность металла (пора внутри металла и т.п.), то этот метод вообще не даст никаких результатов — пропустит дефект.

Да и если дефект обнаружен, то догадаться, какую концентрацию механических напряжений он создал, практически невозможно. Надо измерить его размеры, а затем путем сложного математического расчета можно будет оценить коэффициент концентрации напряжений и опасность выявленного дефекта.

В результате бывают случаи, когда участок трубопровода вырезают на основании заключений магнитопорошковой дефектоскопии, заменяют новой трубой, а при проверке обнаруживается, что дефект только по внешним признакам был опасным.

Несмотря на то, что результат магнитопорошковой дефектоскопии не может быть внесен как документ в базу данных, этот метод входит в семерку методов, применение которых рекомендовано органами Госгортехнадзора.

Из всего описанного не должно сложиться чисто отрицательное отношение к этому методу - - каждый метод имеет достоинства и недостатки. Но достоинства проявляются в области применимости метода. Просто для трубопроводов, резервуаров и сосудов высокого давления сегодня этот метод еще сложно использовать

## 7.7. Методы магнитокристаллической анизотропии

Изучая естественные монокристаллы магнетита и пирротита, Вэйс еще в 1904 году показал, что их магнитные свойства неодинаковы в различных направлениях. Это явление получило название магнитокристаллической анизотропии (далее по тексту — магнитной анизотропии). Оно присуще и другим ферромагнетикам.

Направление, в котором кристалл намагничивается при наиболее слабых магнитных полях, получило название направления легкого намагничивания. У высокопроницаемых магнитомягких ферритов таким направлением является диагональ куба кристалла. В кристаллографии это направление обозначается индексом [111]. Направление ребра куба [100] для них является направлением трудного намагничивания.

У кристаллов других ферромагнетиков направлениями легкого намагничивания могут быть другие кристаллографические оси.

Количественно магнитную анизотропию обычно характеризуют "первой константой анизотропии"  $K_1$ . Эта константа для большинства ферромагнетиков (в первом приближении) пропорциональна энергии, необходимой для поворота спинов, заключенных в 1 куб.см вещества, из направления легкого намагничивания в направление трудного намагничивания.

Ферромагнитные тела состоят из областей, в которых спины имеют определенное направление, совпадающее с направлением одной из кристаллографических осей. Такие области называют *доменами*.

Применяемые на практике ферромагнитные материалы состоят из множества микрокристаллов, являются поликристаллическими средами. Направления вектора намагниченности в различных ферромагнитных областях поликристаллического тела различны. Разделение тела на области (домены) происходит таким образом, что создаваемый этими областями магнитный поток замыкается внутри тела. В каждой такой области намагниченность однородна и по величине равна намагниченности насыщения ферромагнетика при данной температуре.

В природе не бывает абсолютно жестких изменений физических свойств. Поэтому на границе между ферромагнитными областями, в которых магнитные моменты спинов ориентированы антипараллельно (то есть навстречу друг к другу) или перпендикулярно друг к другу, находится слой атомов, магнитные моменты которых постепенно переходят от одной ориентации к другой.

Форму и расположение доменов в классической физике определяют при помощи суспензий, содержащих магнитный порошок, который сам располага-

ется на границах между доменами. По-сути, также поступают в магнитопорошковой дефектоскопии.

Толщина граничных слоев (их называют стенками Блоха) оценивается в несколько десятков, а иногда и в несколько сотен ангстрем.

Воздействие на ферромагнетик внешнего магнитного поля приводит к перемещению граничного слоя и с ростом поля -- к увеличению доменов, магнитные моменты которых составляют острый угол с направлением внешнего поля. Рост доменов происходит за счет областей, магнитные моменты которых неблагоприятно ориентированы по отношению к внешнему полю. В результате этого процесса появляется избыточный магнитный момент тела в направлении внешнего поля, который и определяет собой его намагниченность. Такой механизм намагничивания получил название "смещение доменных границ".

При перемещении граничного слоя изменяется направление спинов как в атомах самого граничного слоя, так и в атомах того объема ферромагнетика, который он уже пересек. В слабых полях процесс смещения является обратимым. С повышением напряженности поля все большую и большую роль начинает играть необратимый процесс смещения.

Наличие в ферромагнетике пор, включений и неоднородностей кристаллической структуры уменьшает магнитную проницаемость, так как препятствует перемещению граничных слоев.

Вокруг пор и неферромагнитных включений, размеры которых больше ширины граничных слоев, образуются дополнительные домены, получившие название субобластей, или субдоменов. Образование субдоменов энергетически выгодно, так как энергия, затрачиваемая на их создание, меньше энергии, необходимой для создания магнитных полюсов в районе пор, неоднородностей и других дефектов.

Намагничивание ферромагнетиков, особенно в сильных полях, происходит также в результате процесса вращения. Этот процесс заключается в том, что спины, преодолевая силы магнитокристаллической анизотропии, стремящиеся удержать их в направлении легкого намагничивания, поворачиваются в направлении внешнего поля.

Намагничивание ферромагнитных сред неразрывно связано с явлением магнитострикции. Это явление заключается в том, что под воздействием магнитного поля ферромагнитное тело изменяет свои размеры. При положительной магнитострикции тело удлиняется в направлении намагничивания, при отрицательной — сжимается. Отрицательная магнитострикция характерна для большинства ферромагнетиков, в том числе и для сталей.

Размеры тела можно изменить механическим воздействием. Оказывается, что при растяжении ферромагнетиков с положительной магнитострикцией их намагниченность возрастает. У ферромагнетиков с отрицательной магнитострикцией намагниченность возрастает при сжатии тела, а при растяжении — уменьшается.

В основе новой технологии дефектоскопии используется эффект магнитной анизотропии и учет основных явлений, связанных с ней.

Данный материал подготовлен с использованием фрагментов из книги "ТЕХНОЛОГИЯ ФЕРРИТОВ" (Л.И.Рабкин, С.А.Соскин, Б.Ш.Эпштейн, М.:ГЭИ, 1962).

## **7.8. Магнитный интроскоп для контроля трубопроводов в процессе эксплуатации без вскрытия грунта**

### **1. Введение и постановка задачи**

В процессе эксплуатации газопроводов нередко происходят разрушения линейных участков, наносящие значительный материальный ущерб. Одной из основных причин разрушений является зарождение и развитие продольных трещин на наружной поверхности газопроводов, вызванных стресс-коррозией и перенапряжением металла трубопровода при отсутствии общей коррозии стенки. В месте расположения коррозионной трещины под влиянием возникающих магнитных полей вызванных током катодной защиты и берущим газовым потоком создается магнитное поле рассеяния от дефекта. Перенапряжение стенки трубы в месте трещины также может стать источником для создания магнитного поля отклика материала стенки на механическое или магнитное воздействие.

Существующие магнитные интроскопы [1-3] разрабатывались для работы в диапазоне магнитных полей рассеяния от дефектов в пределах (10-140) А/см, что имеет место при зазоре между матричным преобразователем интроскопа и поверхностью трубы порядка (3-Ю)мм. Чувствительность магниточувствительных элементов матриц была недостаточной для выявления дефектов в стенке трубопровода при увеличении зазора до (2-3) м [6].

1. Описанный в работе [7] Е.М. Беловым и другими способ поясняет возникновение магнитного поля рассеяния от дефекта с помощью бифуркационно-резонансного метода, при котором появляются виртуальные магнитные домены вследствие движения доменных стенок Блоха через точки неустойчивости или точки бифуркации. При снятии механической нагрузки виртуальные домены исчезают, и их энергия затрачивается на создание магнитного поля отклика от дефекта. Источником механического стенок трубопровода является турбулентный пульсирующий и вращающийся газовый поток. Он же создает бегущее по трубопроводу пульсирующее магнитное поле.

Далее в [7] приводятся сведения из физики твердого тела, вводятся понятия "межузлияна", "примессона", передаточных функций одного домена и материала трубопровода. Рассматривается блок-схема прибора для разности напряженностей магнитного поля дефектного и бездефектного участка трубопровода. Прибор включает в себя два феррозондовых датчика с горизонтальными осями, включенные встречено и один феррозонд с осью расположенной перпендикулярно оси трубопровода. Электронный блок содержит задающий генератор, сигналы с которого через формирователи поступают на обмотки

возбуждения феррозондов, дифференциальный усилитель, синхронный детектор, пороговую схему сравнения, задающий сигнал которой выбирается по результатам предварительных испытаний, АЦП и блок памяти. Кроме того, в приборе смонтированы фильтры нижних и верхних частот, позволяющие осуществлять регистрацию магнитных параметров в ограниченном частотном диапазоне. Чувствительность четно-гармонических феррозондов составляет 126 нТл — 10<sup>-3</sup> А/см.

О теории возникновения магнитного поля отклика от дефекта в стенке трубы на основе бифуркационно-резонансного метода с использованием виртуальных доменов можно сказать, что в настоящее время в практической диагностике она не получила применения и нам неизвестны какие-либо отечественные и зарубежные источники, в которых бы описывались подобные методы. Что касается блок-схемы прибора, то она совпадает полностью со схемой феррозондового градиентометра и с блок-схемой авиационного обнаружителя магнитных аномалий, служащего для определения координат и местоположения объектов (трубопроводов, затонувших кораблей, подводных лодок, мин, автомобилей и т.п.) на расстоянии до 400 м по их постоянному магнитному полю [5; 8]. Принцип действия такого обнаружителя основан на возможности аппроксимации локального поля объектов на расстояниях, превышающих их размеры, магнитным полем диполя и их координат. По нашему мнению в виде подобного диполя можно представить и коррозионный дефект на поверхности трубопровода.

2. Другим возможным способом обнаружения дефектов газопроводов без вскрытия грунта является использования эффекта Баркгаузена, открытого в 1919 г. [9, 10]. Он заключается в скачкообразном изменении намагниченности ферромагнетика при воздействии на него магнитных полей, механических напряжений и т. д. Скачки намагниченности и называют скачками Баркгаузена. В настоящее время известно пять механизмов возникновения скачков Баркгаузена: необратимое движение доменных стенок, возникающих в момент преодоления потенциального барьера, необратимое вращение вектора намагниченности монокристаллической области, возникновение и исчезновение пиков Нееля, инверсирование намагниченности в частицах ферромагнетика, возникновение и движение линии Блоха или Нееля в стенках с противоположно направленной средней намагниченностью.

Коррозионное разрушение стенок газопровода также сопровождается изменениями потенциально-энергетического рельефа стенки трубопровода за счет перераспределения внутренних напряжений, искажений поверхностного слоя, возникновения новой картины распределения дефектов. В этих условиях возникают скачки Баркгаузена, которые могут быть использованы для качественной оценки коррозионного разрушения трубопроводов. Число скачков тесно связано с количеством барьеров потенциальной энергии, а они, в свою очередь, коррелируют с дефектами в стенке трубы.

Наибольшие трудности возникают при преобразовании энергии скачков Баркгаузена. Из всех видов энергии скачков (магнитная, механическая, тепло-

вая и др.) наибольший уровень имеет магнитная, для преобразования которой используются преобразователи магнитного поля (гальваномагнитные, феррозондовые и т.д.). Плотность скачков Баркгаузена составляет  $10^{-4}$  -  $10^{-5}$  А/см. Скачки возникают при величине магнитного поля  $10^4$  А/см и регистрируются дистанционно на расстоянии один метр и более.

3. В нашей стране в последние годы Великой отечественной войны была разработана схема с двумя феррозондами трансформаторного типа для поиска затопленных кораблей [3]. После подавления специальными приемами помех со стороны железа поискового корабля-носителя до величины  $10^{-4}$  А/см, устройство могло работать с чувствительностью  $5 \cdot 10^{-5}$  А/см на делении шкалы при базе 30 м (длина поискового корабля). С его помощью были найдены более 130 затопленных кораблей.

Методы обнаружения объектов по их постоянному магнитному полю получили в последние годы широкое развитие благодаря разработке новых типов высокочувствительных сверхпроводниковых преобразователей магнитного поля, обладающих высокой чувствительностью (до  $10^{-13}$  Тл/м -  $10^{-6}$  А/см) при малой базе (0,3-0,2 м), что примерно на два порядка меньше градиента нормальной составляющей магнитного поля у поверхности Земли. Проблема охлаждения сверхпроводниковых преобразователей успешно решается с помощью криостатной техники, а проблема обработки сигналов от преобразователей, компенсации мешающих магнитных полей, вычисления координат объектов решается благодаря резко возросшей производительности, уменьшения веса и габаритов компьютерной техники, работающей в реальном масштабе времени.

## 2. Решение проблемы

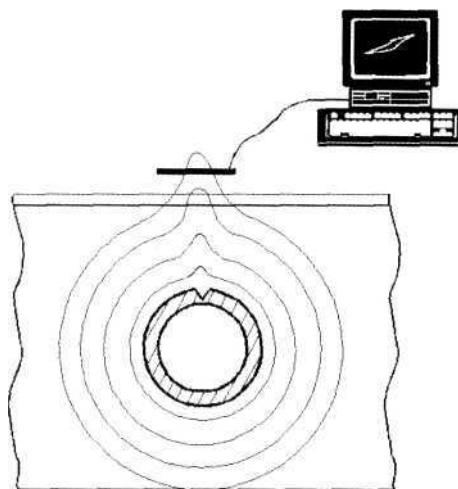


Рис.7.8.1



Наиболее перспективным с практической точки зрения для выявления дефектов в виде коррозионных трещин в газопроводах в процессе эксплуатации без вскрытия грунта являются методы:

1. Выявления магнитных полей рассеяния от трещин, аппроксимированных магнитным диполем. Достоинством такого метода является то, что он уже апробирован в отечественной и мировой практике для обнаружения объектов по их постоянному магнитному полю.

2. Метод использования эффекта Баркгаузена. Этот метод позволит выявлять дефекты как верхней, так и нижней части трубопровода.

Рассмотрим эти методы.

Допустим, величина тангенциальной составляющей поля рассеяния от трещиноподобного дефекта в стенке трубопровода на расстоянии 5 мм от поверхности трубопровода составляет (10-140) А/см. Это поле рассеяния образуется под действием тока катодной защиты (20-30 А) и под действием перемещающегося по трубопроводу со скоростью (10-13 м/сек) газового потока, представляющего собой поток электрических зарядов. Этот поток также осуществляет циркулярное намагничивание стенок трубопровода, причем магнитные силовые линии расположены перпендикулярно полости продольных трещин, что позволяет получать поля рассеяния от дефектов наибольшей величины (рис. 7.8.1). Известно, что с увеличением расстояния от точки контроля до поверхности трубопровода поле рассеяния от дефекта уменьшается по квадратичному закону. Следовательно, на расстоянии 3 м оно уменьшится в 3600 раз и составит 310" А/см. Подходящую чувствительность имеют современные гальваномагнитные преобразователи: тонкопленочные магниторезисторы и магниторезисторы с гигантским магниторезистивным эффектом, а феррозонды. Поскольку выделение малых величин поля рассеяния от продольной трещины газопровода производится на фоне мешающих полей (поле земли, поле самого трубопровода, поле носителя, на котором расположены преобразователи) необходимо градиент поля над трубопроводом. Для решения этой задачи строчные преобразователи располагаются на расстоянии (базе) до 0,5 м. При перемещении таких строчных преобразователей трубопровода осуществляется электромеханическое сканирование поверхности земли над трубопроводом. Результирующий сигнал будет характеризоваться разностью напряженностей магнитного поля дефектного и бездефектного участка трубопровода. Поскольку измеряется градиент поля, то автоматически будут компенсироваться мешающие магнитные поля земли, трубы и других. При сканировании поверхности земли над исправным трубопроводом сигнал с выхода преобразователя будет отсутствовать. При сканировании дефектного участка происходит искажение магнитных силовых линий трубопровода, вызванных током катодной защиты и газовым потоком, а на выходе строчного преобразователя появляется сигнал, несущий информацию об ориентации трещин, их длине, глубине и раскрытии.

### 3. Выводы

Контроль газопроводов в процессе эксплуатации без вскрытия грунта возможен с помощью методов для обнаружения и определения местоположения объектов по их постоянному магнитному полю, разработанных еще в период второй мировой войны для поиска подводных лодок, мин и затонувших кораблей, а также методов, основанных на использовании эффекта Баркгаузена.

С учетом вышеизложенного можно сказать, что направление по магнитному контролю газопроводов в процессе эксплуатации без вскрытия грунта является перспективным и может после проведения соответствующих научных и опытно-конструкторских работ дать значительный экономический эффект при эксплуатации газопроводов и повысить их экологическую безопасность.

Необходимо проведение работ по созданию высокочувствительных строчных преобразователей для визуализации магнитных полей рассеяния от дефектов на больших расстояниях (до 3-х м) и измерения параметров коррозионных трещин (длины, раскрытия и глубины), а также отработки методики контроля газопроводов в процессе эксплуатации без вскрытия грунта

### ЛИТЕРАТУРА

1. *Абакумов А.А.* Магнитная интроскопия. — М.; Энергоатомиздат, 1996, 272 с.
2. *Сухоруков В.В., Вайнберг Э.Й., Кажис Р.Ю., Абакумов А.А.* Неразрушающий контроль (в 5 кн.). Интроскопия и автоматизация контроля / Под ред. В.В. Сухорукова. — М.; Высшая школа, 1993, 330с.
3. *А.А. Абакумов.* Феррозонды в магнитной интроскопии. -- Обнинск: ИАТЭ, 1992, 248с.
4. *Матвеев.* Электричество и магнетизм. — М; Высшая школа. .983,463с. отд., 1986, 188с.
5. *Коллакот.* Диагностика повреждений. — М.: Мир, 1989, 434с.
6. *Е.М. Белов, И.И. Велиюлин, В.П. Лобанов.* Бесконтактный способ обнаружения дефектов в металле труб действующего трубопровода. Сборник трудов 6-ой международной встречи "Диагностика-96", (154-166с).
7. *Яроцкий В.А.* Методы обнаружения и определения объектов по их постоянному полю."Зарубежная радиоэлектроника", 1984, N4, (45-56.).
8. *Ломаев Г.В.* Метод магнитных шумов в неразрушающем контроле ферромагнетиков. Дефектоскопия, 1977, N 4, с. 75-94.
9. *Колачевский Н.Н.* Флуктуационные явления в ферромагнитных материалах. М.: Наука, 1985, 180 с.

## 7.9. Приборы и технические средства магнитных методов

### Магнитный интроскоп МИ -10

Является концептуально новым прибором, обладающим широкими функциональными возможностями, не имеющим аналогов в РОССИИ и за рубежом. Проведенные испытания показывают высокую эффективность прибора при выявлении протяженных дефектов как тела объекта контроля, так и его сварных соединений.

#### НАЗНАЧЕНИЕ

Предназначен для диагностирования линейной части газонефтепроводов, обсадных и насосно-компрессорных труб скважин, резервуаров, в том числе без удаления защитной изоляции и остановки работы трубопроводов.

#### ОБЪЕКТЫ КОНТРОЛЯ

Ферромагнитные изделия простой формы типа труб, котлов, резервуаров, рефракционных колонн, трубопроводов, листового проката и т.д.

#### ТИПЫ ВЫЯВЛЯЕМЫХ ДЕФЕКТОВ

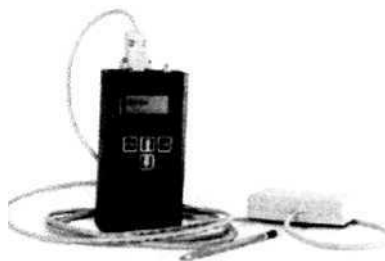
Выявляются протяженные дефекты типа нарушения сплошности (коррозионные и усталостные трещины, непровары, язвы) при толщине стенки объекта до 25 мм.

#### ОТЛИЧИТЕЛЬНЫЕ ОСОБЕННОСТИ

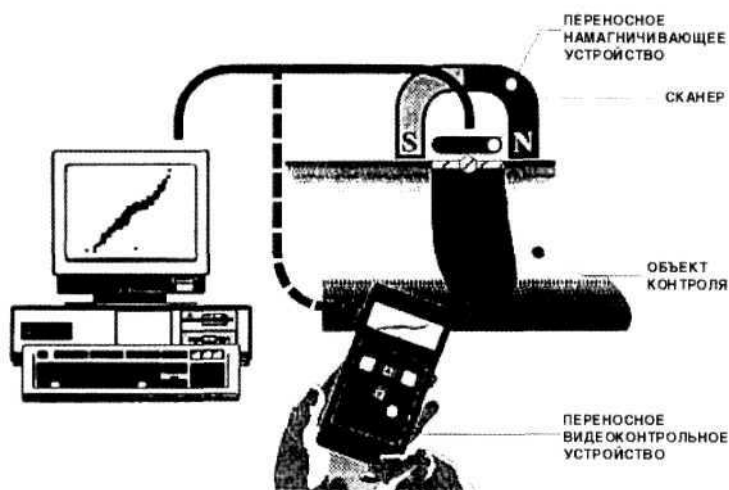
Основное отличие магнитного интроскопа от известных приборов, реализующих магнитные методы диагностирования, заключается в получении двух и трехмерных изображений полей рассеяния дефектов на экране персонального компьютера или видеоконтрольного устройства непосредственно в процессе проведения контроля. По изображению осуществляется оценка формы дефектов, их размеров, ориентации и взаимного расположения. Диагностирование линейной части газонефтепроводов возможно проводить как при наличии изоляции, так и без нее при капитальном ремонте трубопроводов и при плановом обследовании, с помощью магнитных интроскопов, встроенных во внутри-трубные инспекционные снаряды или же расположенных с внешней стороны трубопроводов в шурфах.

#### ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ:

Основан на визуализации магнитных полей рассеяния от дефектов, возникающих при намагничивании объектов контроля с помощью передвижных намагничивающих устройств или иным методом. Возможно проведение контроля по остаточной намагниченности.



Для сканирования поверхности трубопроводов используются многоэлементные преобразователи магнитного поля, основанные на применении ферроиндукционных, гальваномагнитных магниточувствительных сенсоров. Интроскоп осуществляет цифровую обработку получаемых изображений дефектов и оценку их геометрических параметров (длину, раскрытие и глубину).



#### КОМПЛЕКТАЦИЯ:

1. Сканер магнитного поля;
2. Видеоконтрольное устройство (ВКУ) для использования в полевых условиях или персональный компьютер для стационарных условий;
3. Передвижное намагничивающее устройство (НУ) на постоянных магнитах.

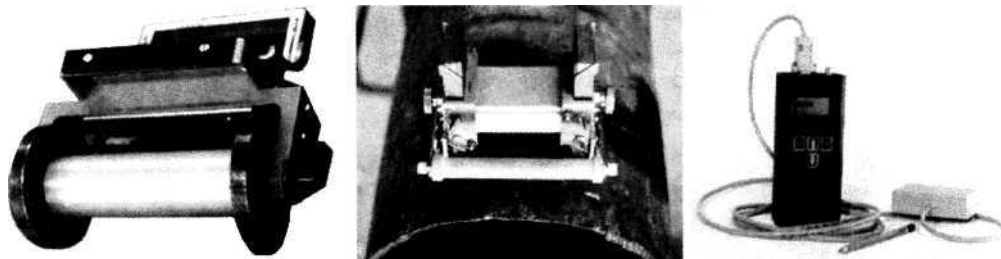
#### АПРОБАЦИЯ И ПАТЕНТНАЯ ЗАЩИЩЕННОСТЬ:

Магнитный интроскоп успешно прошел испытания в ДАО "ОРГЭНЕРГО-ГАЗ" и ВНИИГАЗ РАО "ГАЗПРОМ".

Конструкции намагничивающих устройств, сканеров и электронных блоков интроскопа защищены ПО авторскими свидетельствами и патентами РФ.

Намагничивание объектов для обеспечения требуемой чувствительности необходимо при контроле изделий из низкоуглеродистых сталей. Для намаг-

ничивания может быть использован любой из известных методов: продольное, циркулярное или комбинированное.



#### ТЕХНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ:

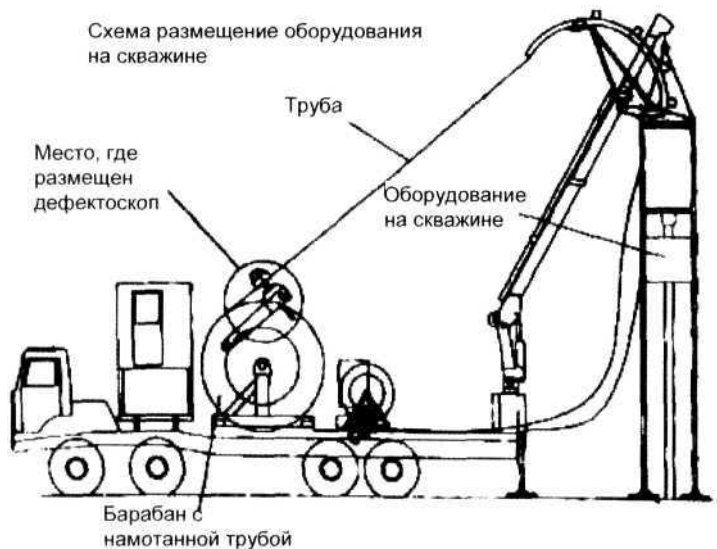
- |                                                     |                                   |
|-----------------------------------------------------|-----------------------------------|
| • Раскрытие выявляемых дефектов до                  | 30 мкм                            |
| • Толщина стенки контролируемых объектов до         | 25 мм                             |
| • Глубина залегания выявляемых дефектов до          | 20 мм                             |
| • Глубина выявляемых дефектов                       | до 20% от толщины стенки          |
| • Производительность не менее                       | 1 м/мин                           |
| • Минимальная длина выявляемых дефектов             | 5 мм                              |
| • Погрешности измерения                             |                                   |
| - Длины трещин                                      | 7% (при длине трещин более 20 мм) |
| - Раскрытия поверхностных и подповерхностных трещин | 15%                               |
| - Глубины поверхностных и подповерхностных трещин   | 15%                               |
| • Габаритные размеры                                |                                   |
| - ВКУ                                               | 160x80x20 мм                      |
| - Сканера                                           | 100x60x10 мм                      |
| - Передвижного П-образного НУ                       | 200x200x100 мм                    |
| - Передвижного гантелеобразного НУ                  | 230x200x200 мм                    |
| • Масса                                             |                                   |
| - Сканера и ВКУ                                     | 600 г                             |
| - Передвижного П-образного НУ                       | 5 кг                              |
| - Передвижного гантелеобразного НУ                  | 5 кг                              |
| • Потребляемая мощность                             | 20 мВт                            |

#### **Магнитный дефектоскоп для диагностики длинномерных труб малого диаметра**

Он предназначен для контроля труб высокого давления, использующихся при ремонте газовых скважин. Схема размещения дефектоскопа показана на рисунке:

## ТЕХНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ:

|                                                     |                                                                                                                                                                |
|-----------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1. Типы выявляемых дефектов                         | Механические и коррозионные трещины, изменения толщины стенок труб, протяженные дефекты сварных швов                                                           |
| 2. Минимальная длина выявляемых дефектов            | 10 мм                                                                                                                                                          |
| 3. Раскрытие выявляемых дефектов                    | 30 мкм                                                                                                                                                         |
| 4. Глубина выявляемых дефектов                      | 20% от толщины стенки трубы                                                                                                                                    |
| 5. Погрешности определения:                         |                                                                                                                                                                |
| • Длины трещин                                      | 10% (при длине трещин более 10 мм)                                                                                                                             |
| • Раскрытия поверхностных и подповерхностных трещин | 15%                                                                                                                                                            |
| • Глубины поверхностных и подповерхностных трещин   | 15%                                                                                                                                                            |
| 6. Требования к контролируемой поверхности          | Обнаружение трещин и изменения потери площади сечения трубы с изоляционным покрытием и без покрытия. Труба в процессе работы смазывается ингибитором коррозии. |



|                                                         |                                                                                                          |
|---------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 7. Тип намагничивающего устройства                      | Постоянный магнит                                                                                        |
| 8. Скорость контроля                                    | До 3 м/сек                                                                                               |
| 9. Погрешность определения потери площади сечения трубы | 5%                                                                                                       |
| 10. Вариации зазора между сканером и металлом трубы     | Не более 20% от толщины стенки трубы. Конструкция дефектоскопа должна отслеживать перемещение трубы.     |
| 11. Регистрация данных                                  | Первичная информация отображается на табло и записывается в память                                       |
| 12. Диапазон рабочих температур                         | От -20 °С до +40 °С                                                                                      |
| 13. Диаметр исследуемой трубы                           | 33,5; 38,1; 42,3 мм                                                                                      |
| 14. Толщина стенок трубы                                | 2,8 - 5,2 мм                                                                                             |
| 15. Длина трубы                                         | До 6000 м                                                                                                |
| 16. Класс защиты внешней оболочкой                      | IP-66                                                                                                    |
| 17. Вес магнитного дефектоскопа                         | 15 кг                                                                                                    |
| 18. Питание                                             | Аккумуляторные батареи PS1212 или аналогичные, внешний источник постоянного тока напряжением от 9 до 24В |
| 19. Время непрерывной работы                            | Не менее 6 часов                                                                                         |

## **Магнитные интроскопы МИ-10 и МИ-20**

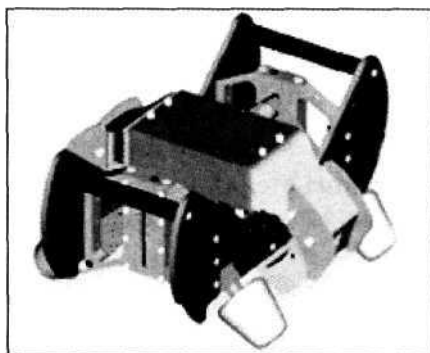
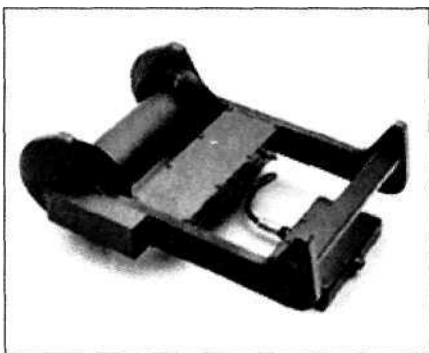
### **НАЗНАЧЕНИЕ**

Предназначены для диагностирования линейной части водогазопаропроводов, обсадных и насоснокомпрессорных труб скважин, резервуаров, в том числе без удаления защитной изоляции и остановки работы трубопроводов.

## ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ

Основан на регистрации магнитных полей рассеяния от дефектов, возникающих при намагничивании объектов контроля с помощью передвижных намагничивающих устройств или иным методом, в том числе по остаточной намагниченности.

Регистрация осуществляется путем сканирования приповерхностного магнитного поля с помощью многоэлементных датчиков, основанных на применении ферроиндукционных и гальваномагнитных магниточувствительных сенсоров. Интроскоп осуществляет цифровую обработку показаний датчиков, восстановление компьютерного изображения поля рассеяния от дефектов. Обработка изображения дефектов и оценка их геометрических параметров осуществляется визуально оператором с параллельной автоматической отбраковкой.



## ОТЛИЧИТЕЛЬНЫЕ ОСОБЕННОСТИ

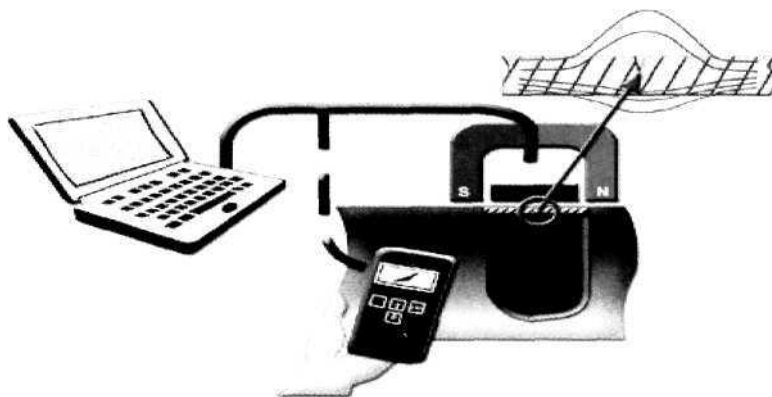
Впервые в мировой практике и в России разработан прибор, позволяющий за счет использования многоэлементных датчиков и электронно-механическое сканирования магнитного поля не только регистрировать дефекты, но и определять их геометрические размеры, форму, ориентацию и взаимное расположение. Компьютерная обработка информации позволило упростить процесс подготовки отчетов и создать систему архивирования результатов контроля.

Магнитный интроскоп позволяет проводить диагностирование без удаления защитной изоляции и остановки работы оборудования, что дает возможность повысить производительность и уменьшить затраты на проведение диагностических работ по сравнению с традиционными методами.

## ВЫЯВЛЯЕМЫЕ ДЕФЕКТЫ

Выявляются дефекты типа нарушение сплошности (коррозионные и усталостные трещины, непровары, язвы) при толщине стенки объекта до 25 мм.





## СОСТАВ МАГНИТНОГО ИНТРОСКОПА

1. Сканер магнитного поля.
2. Видеоконтрольное устройство (ВКУ) для использования в полевых условиях или персональный компьютер для стационарных условий.
3. Передвижное намагничивающее устройство (НУ) на постоянных магнитах.

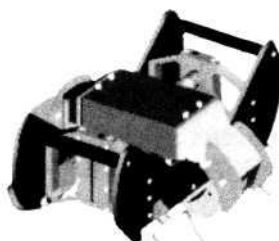
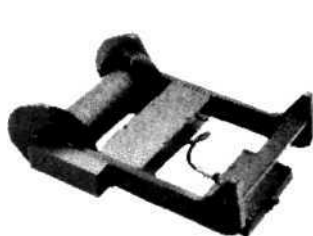
## АПРОБАЦИЯ И ПАТЕНТНАЯ ЗАЩИЩЕННОСТЬ

Магнитный интроскоп успешно прошел испытание во ВНИИГАЗ ОАО "ГАЗПРОМ" и ООО "ПЕРМТРАНСГАЗ". Использование магнитных интроскопов серии МИ-ХХ регламентировано инструкцией по магнитному контролю линейной части газонефтепродуктопроводов ВРД 39-1.11-027-2001, утвержденной постановлением Госгортехнадзора России №10-03/46 от 15.01.2001 г.

Конструкции намагничивающих устройств, сканеров и электронных блоков интроскопа защищены 110 авторскими свидетельствами и патентами РФ.

## ТЕХНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ:

- Раскрытие выявляемых дефектов: до 30 мкм
- Толщина стенки контролируемых объектов: до 25 мм



- Глубина залегания выявляемых дефектов: до 20 мм
- Глубина выявляемых дефектов: до 20% от толщины  
стенки
- Производительность: до 0.5 м/с
- Минимальная длина выявляемых дефектов: 5 мм
- Погрешности измерения:
  - Длины трещин 7% (при длине трещин более 20 мм)
  - Раскрытия поверхностных и подповерхностных трещин 15%
  - Глубины поверхностных и подповерхностных трещин 15%
- Габаритные размеры:
  - ВКУ 160x80x20 мм
  - Сканера 100x60x10 мм
  - Передвижного П-образного НУ 500x400x200 мм
  - Передвижного гантелеобразного НУ 230x200x200 мм
- Масса:
  - Сканера и ВКУ 600 г
  - Передвижного П-образного НУ 20 кг
  - Передвижного гантелеобразного НУ 15 кг
- Потребляемая мощность: 20 мВт

## **Магнитный интроскоп**

### **НАЗНАЧЕНИЕ**

Магнитный интроскоп предназначен для неразрушающего контроля внутренней структуры ферромагнитных объектов: труб, котлов, резервуаров, реакционных колонн, листового проката и т. д.

### **ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ**

Принцип действия разработанного магнитного интроскопа основан на визуализации магнитного поля рассеяния от дефектов, возникающего в результате намагничивания исследуемого объекта с помощью намагничивающего устройства.

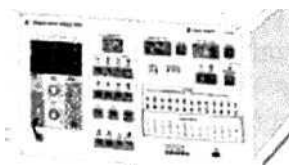
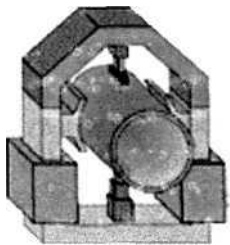
### **ОСНОВНОЕ ОТЛИЧИЕ**

Основное отличие разработанного магнитного интроскопа от известных приборов, реализующих магнитные методы неразрушающего контроля, заключается в том, что производится сканирование не отдельной точки исследуемой поверхности, а целого ее участка. При этом осуществляется отображение магнитного поля рассеяния, лежащего вдоль этого участка, на экране персонального компьютера или видеоконтрольного устройства в режиме реального времени, то есть непосредственно в процессе контроля.

## ТЕХНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

- Чувствительность — 300 В/(А\*см);

- Разрешающая способность. Этот параметр зависит от размера магниточувствительных элементов сканера и должен быть оговорен заранее. Возможно изготовление сканера с разрешающей способностью от 1 мкм до 1-2 мм;



- Потребляемая мощность - не более 15 мА при максимальном потреблении. Это позволяет осуществлять питание от обычной батареи 9 В или от информационного сигнала последовательного порта персонального компьютера;

- Точность - - 0.5 % (определяется, в основном, погрешностью АЦП сканера);

- Габаритные размеры:

Сканера 100x60x10 мм;

Видеоконтрольного устройства 160x80x20 мм;

- Производительность контроля не менее 1 м/мин;

- Масса 600 г;

## ОБЛАСТИ ПРИМЕНЕНИЯ МАГНИТНОГО ИНТРОСКОПА

Магнитный интроскоп может быть использован для неразрушающего контроля крупногабаритных ферромагнитных изделий (труб, котлов, резервуаров, трубопроводов, теплообменников и т. д.) объектов тепловой и атомной энергетики, металлургии, трубопроводного транспорта и нефтехимии.

## ВОЗМОЖНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ РАЗРАБОТОК

- Разработка и изготовление магнитных интроскопов;
- Разработка подсистем сбора и обработки данных;
- Переносные дисплейные устройства разрешением от 100/32 точки до 640/640 точек на базе жидкокристаллических дисплейных матриц с понижен-

ным энерго-потреблением и встроенным процессорным блоком ( в том числе и цветные);

- Встраиваемые специализированные микропроцессорные системы на базе PIC-контроллеров, контроллеров семейства iMCS-51/52 и iMCS-96/196 под заказ.

## **Многоканальная электромагнитная установка ВМД-ЗОН для дефектоскопического контроля труб в потоке их производства**

### **НАЗНАЧЕНИЕ**

Применяется для выявления дефектов типа нарушений сплошности металла трубы (трещин, волосовин, плен, закатов, рванин, неметаллических включений) по всей толщине стенки, если глубина дефекта превышает заданный порог чувствительности прибора. Используется для контроля как концевых участков, так и всего тела трубы.

### **ОБЛАСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ**

Автоматизированный контроль труб при их производстве на трубных заводах, а также при входном контроле на трубных базах нефтегазовых компаний, машиностроительных заводов.

### **ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ**

Основан на одновременном использовании постоянного магнитного поля для поперечного намагничивания трубы и переменного ( $f=300\text{кГц}$ ) электромагнитного поля для зондирования поверхностных наружных слоев тела трубы.

Поля рассеяния в зоне дефекта, создаваемые за счет постоянной составляющей поля, считываются магнитными датчиками.

Поля рассеяния, создаваемые переменным электромагнитным полем, считываются вихретоковыми дифференциальными датчиками. Сигналы от поверхностных дефектов наводятся как в магнитных, так и вихретоковых датчиках, от внутренних — только в магнитных. Контроль труб производится двумя накладными кассетами с двенадцатью преобразователями (шесть — магнитных, шесть — вихретоковых) каждая. Число параллельных измерительных каналов — 24.

Обработка информации — цифровая с помощью встроенного микропроцессора.

### **ОСНОВНЫЕ ДОСТОИНСТВА**

- соответствие требованиям передовых стандартов ISO, API (США), DIN (Германия), ГОСТов (Россия);
- высокая достоверность контроля (высокая надежность выявления дефектов при низком уровне брака);

- определение зоны расположения дефекта (поверхностный дефект или внутренний)

#### ТЕХНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

|                        | <b>Исполнения</b>                                                           |           |            |
|------------------------|-----------------------------------------------------------------------------|-----------|------------|
|                        | <b>I</b>                                                                    | <b>II</b> | <b>III</b> |
| Диаметр труб, мм       | 42-146                                                                      | 60-350    | 120-520    |
| Толщина стенки, мм     | 5-12                                                                        | 5-20      | 5-20       |
| Скорость контроля, м/с | 0,1-0,7                                                                     | 0.1-0.5   | 0.1-0.4    |
| Чувствительность       | согласно стандартов ISO 9402, DIN, API                                      |           |            |
| Производительность     | 60-100 шт./час в зависимости от диаметра и возможностей средств механизации |           |            |

## Глава 8.

### ПРИМЕНЕНИЕ МАГНИТОВ И МАГНИТНОГО ПОЛЯ В СОВРЕМЕННОЙ МЕДИЦИНЕ

#### 8.1. Введение и краткая историческая справка

Магнитное поле, наряду со свето-, теплолечением, является одним из древнейших физических факторов, применяемых для терапии. Достаточно назвать дошедшие до нас имена таких врачей древности и средневековья как Аристотель (4 в. до н.э.), Плиний, Диоскориод (1 в. н.э.), Гален (2 в. н. э.), Авиценна (10 в. н.э.), Амбруаз Паре, Парацельс (16 в. н.э.), Ленобль, которые применяли магниты в качестве слабительного средства, в лечении водянки, болезней печени и селезенки, при кровотечениях, грыжах, переломах костей. Позднее Шарко и Труссо применили созданные искусственные магниты. В современной медицине официальной датой применения магнитотерапии считается 1780 г. и связано с именами французских врачей Анри и Туре. Дальнейшее развитие этого метода терапии основано на общем развитии техники ( работы Эрстеда, Ампера, Фарадея, Максвелла) и проходило достаточно интенсивно в различных странах, в том числе и в России и Советском Союзе. Это работы И.И. Григорьева, В.Я. Данилевского, В.И. Кармилова, Ю.А. Холодова (1), М.П. Травкина, А.П. Дуброва, Приятно вспомнить в данной краткой исторической справке и белорусского ученого А.М. Демецкого из Витебска, возглавлявшего с середины 70-х годов проблемную комиссию Минздрава СССР "Магнитобиология и магнитотерапия в медицине" (12). В то же время, несмотря на очень глубокие исторические корни применения магнитных полей в медицине, достаточно серьезные исследования по механизмам их лечебного действия проведены только за последние 2 -3 десятилетия, и связаны во многом с фундаментальными исследованиями научной школы А.С. Пресмана (13 ). Тем не менее, до настоящего времени нет полной ясности в механизмах воздействия магнитных полей на человеческий организм, однако это ни в коей мере не должно препятствовать активному применению их в терапевтической практике, в первую очередь в силу неинвазивности, воспроизводимости и, что особенно важно, экономичности. Так, забегая несколько вперед, нам удалось обсчитать сравнительные затраты по применению аппарата "Гемоспок" для проведения неинвазивной гемагнитотерапии для достижения антиагрегантного эффекта. Экономичность метода на порядок ниже, нежели при достижении такового при применении известного медикаментозного антиагреганта - пентоксифиллин (трентал).

В настоящем разделе представлен обзор различных возможностей использования магнитов и магнитных материалов в медицинских целях. Речь идет как о широко известных, хорошо зарекомендовавших себя областях применения, так и об инновационных. Данная статья ни в коем случае не может рассматри-

ваться как руководство по применению тех или иных методик, она лишь предлагает широкому кругу читателей познакомиться с перспективами и проблемами использования магнитов в медицине, а, возможно, и принять участие в дальнейших исследованиях.

## **8.2. Биофизические и биохимические основы магнитотерапии**

Выделяют следующие механизмы первичного действия постоянных и переменных магнитных полей на биологические объекты.

Под влиянием магнитных полей у макромолекул (ферменты, нуклеиновые кислоты, протеины и т.д.) происходит возникновение зарядов и изменение их магнитной восприимчивости. В связи с чем магнитная энергия макромолекул может превышать энергию теплового движения, а поэтому магнитные поля даже в терапевтических дозах вызывают ориентационные и концентрационные изменения биологически активных макромолекул, что отражается на кинетике биохимических реакций и скорости биофизических процессов.

В механизме первичного действия магнитных полей большое значение придается ориентационной перестройке жидких кристаллов, составляющих основу клеточной мембраны и многих внутриклеточных структур. Происходящие ориентация и деформация жидко-кристаллических структур (мембраны, митохондрии и др.) под влиянием магнитного поля сказываются на их проницаемости, играющей важную роль в регуляции биохимических процессов и выполнении ими биологических функций.

Воздействие магнитными полями на элементарные токи в атомах и молекулах вне- и внутриклеточной воды, приводит к изменениям ее квазикристаллической структуры. Возникают изменения свойств воды: поверхностного напряжения, вязкости, электропроводимости, диэлектрической проницаемости и др., вследствие определенной пространственной ориентации элементарных токов в ее атомах и молекулах. Это способствует выполнению своих специфических функций молекулам белков, нуклеиновым кислотам, полисахаридам и другим макромолекулам, образующих с водой единую систему, транспорт и метаболизм которых зависит от связанного с водой состояния.

Одним из важных регуляторных механизмов в живых системах является активность ионов. Она определяется, прежде всего, их гидратацией и связью с макромолекулами. При действии магнитных полей различающиеся по своим магнитным и электрическим свойствам компоненты системы (ион-вода, белок-ион, белок-ион-вода) будут совершать колебательные движения, параметры которых могут не совпадать. Последствием этого процесса будет освобождение части ионов из связи с макромолекулами и уменьшение их гидратации, а, следовательно, возрастание ионной активности. Увеличение под влиянием магнитного поля ионной активности в тканях, является предпосылкой к стимуляции клеточного метаболизма.

При воздействии на сосуды магнитные поля ориентируют не только биологически активные макромолекулы, но и надмолекулярные и клеточные

структуры. Ярким примером такой ориентации является выстраивание цепочек эритроцитов под действием магнитных полей. С уменьшением диаметра сосуда отмечается ослабевание магнитодинамического эффекта. Среди макроскопических эффектов магнитных полей упоминается их пондеромоторное действие на нервные стволы и мышечные волокна, проявлением чего является изменение их электрофизических активности и функциональных свойств.

Особо следует отметить специфическое действие переменного и импульсного магнитного поля. В нем кроме диамагнитного и парамагнитного взаимодействия происходит взаимодействие с переменным электрическим полем, которое возникает при любом изменении магнитного поля. Поскольку в тканях имеются свободные заряды, ионы или электроны, то индуцированное электрическое поле вызовет их движение, то есть электрический ток, который обладает многообразным биологическим действием.

Исходя из вышеперечисленных механизмов действия можно сказать, что постоянное магнитное поле влияет на ткани организма черед диа- и парамагнитные эффекты, а переменное и импульсное, кроме того, через электрические токи, генерируемые им. При реализации действия на живые системы задействуются субмолекулярные, молекулярные и надмолекулярные структуры, что влечет за собой изменения на клеточном, системном и организменном уровне.

### **8.2.1. Механизмы физиологического и терапевтического действия**

Действие магнитного поля на организм характеризуется:

различиями в индивидуальной чувствительности и неустойчивостью реакций организма и его систем на воздействие магнитного поля;

корректирующим влиянием магнитного поля на организм и его функциональные системы. Воздействуя на фоне повышенной функции органа или системы, приводят к ее снижению, а применение магнитного поля в условиях угнетения функции сопровождается ее повышением;

изменением направления фазности реакций организма под действием магнитного поля на противоположное;

степенью выраженности терапевтического действия, на которую влияют физические характеристики магнитного поля. Эффект и изменения в органах более выражены при воздействии переменного и импульсного магнитного поля, чем постоянного;

многим реакциям организма присущ пороговый или резонансный характер, особенно при использовании импульсных магнитных полей;

следовым характером действия магнитного поля. После однократных воздействий реакции организма сохраняются в течение 1-6 суток, а после курсовых процедур 30-45 дней, что обуславливает перерыв между повторными курсами лечения на этот период.

Органы и системы организма по разному реагируют на действие магнитного поля. Избирательность ответной реакции организма зависит от электрических и магнитных свойств тканей, их различия в микроциркуляции, интен-



сивности метаболизма и состояния нейрогуморальной циркуляции. По степени чувствительности различных систем организма к магнитному полю первое место занимает нервная, затем эндокринная системы, органы чувств, сердечно-сосудистая, кровь, мышечная, пищеварительная, выделительная, дыхательная и костная системы.

Действие магнитного поля на нервную систему характеризуется изменением поведения организма, его условно-рефлекторной деятельности, физиологических и биологических процессов. Это возникает за счет стимуляции процессов торможения, что объясняет возникновение седативного эффекта и благоприятное действие магнитного поля на сон и эмоциональное напряжение. Наиболее выраженная реакция со стороны ЦНС наблюдается в гипоталамус, далее следуют кора головного мозга, гиппокамп, ретикулярная формация среднего мозга. Это в какой-то степени объясняет сложный механизм реакций организма на воздействие магнитным полем и зависимость от исходного функционального состояния, в первую очередь нервной системы, а затем уже других органов.

Со стороны гипоталамуса, под действием магнитного поля, отмечается синхронизация работы секреторных клеток, усиление синтеза и выведение нейросекрета из его ядер. Одновременно происходит усиление функциональной активности всех долей гипофиза. Однако при длительных и мощных (более 70 мТл) воздействиях может возникнуть угнетение нейросекреторной функции и развитие продуктивно-дистрофических процессов в клетках ЦНС. Под влиянием магнитного поля с индукцией малой интенсивности снижается тонус церебральных сосудов, улучшается кровоснабжение мозга, происходит активация азотистого и углеводно-фосфорного обмена. Что повышает устойчивость мозга к гипоксии. При воздействии магнитным полем на шейные симпатические узлы и паретичные конечности у больных, мозговой инсульт, отмечается улучшение церебрального кровотока (данные реоэнцефалографии) и нормализация повышенного артериального давления, что доказывает рефлекторный путь действия магнитного поля. Выраженное улучшение мозговой гемодинамики отмечено при применении магнитного поля на субкципитальную область у больных с недостаточностью кровообращения в вертебробазиллярной системе. Воздействие переменного магнитного поля на воротниковую область также приводило к улучшению гемодинамики и снижению как систолического, так и диастолического давления до нормальных цифр. Таким образом, при помощи переменного магнитного поля возможно коррекция нарушенной мозговой гемодинамики при различных патологических состояниях.

Периферическая нервная система реагирует на действие магнитного поля понижением чувствительности периферических рецепторов, что обуславливает обезболивающий эффект, и улучшением функции проводимости, которая благотворно влияет на восстановление функций травмированных периферических нервных окончаний за счет улучшения роста аксоном, миелинизации и торможения развития в них соединительной ткани.

Возбуждение гипоталамо-гипофизарной системы вызывает цепную реакцию активации периферических эндокринных желез-мишеней под влиянием релизинг-факторов, синтез которых стимулируется в гипоталамо-гипофизарной системе, а затем и многочисленных разветвленных метаболических реакций. В эндокринной системе при воздействии ПеМП индукций до 30 мТл частотой до 50 Гц с небольшой экспозицией, до 20 минут, происходит развитие реакции тренировки и повышенной активности всех отделов эндокринной системы. Со стороны щитовидной железы отмечается стимуляция ее функции по действию магнитного поля в отличие от угнетающего эффекта многих других раздражителей, что дает предпосылки к использованию магнитных полей в комплексной терапии при ее гипофункции. Симпатико-адреналовая система лишь слабо активируется на первых процедурах, а к 7-9 дню формируется торможение периферических (3-адренорецепторов, которое играет важную роль в формировании антистрессорного эффекта. Увеличение индукции (выше 120 мТл) и частоты магнитного поля (выше 100 Гц), а также изменение времени его действия сопровождается появлением гемодинамических расстройств, а вслед за этим и дистрофических изменений в клетках гипофиза, надпочечников и других органов, что свидетельствует о развитии стрессовых реакций, которые влекут за собой сдвиги в обмене веществ, снижение интенсивности энергетических процессов, гликолиз, нарушение проницаемости клеточных мембран, гипоксию.

При воздействии переменного и бегущего импульсного магнитного поля одной индукции и частоты при различных локализациях (голова, область сердца, предплечье) возникает однотипная реакция со стороны сердечно-сосудистой системы, что дает основание предположить рефлекторную природу действия этих полей на нее.

Отмечается снижение давления в системе глубоких и подкожных вен, артериях. Одновременно повышается тонус стенок сосудов, происходят изменения упруго-эластических свойств и биоэлектрического сопротивления стенок кровеносных сосудов. Изменения гемодинамики, а именно гипотензивный эффект, связан с развитием брадикардирующего эффекта, а также за счет снижения сократительной функции миокарда. Это свойство нашло применение при лечении гипертонической болезни, а также используется для снижения нагрузки на сердце.

Магнитное поле оказывает воздействие на развитие изменений в микроциркуляторном русле различных тканей. В начале воздействия магнитного поля происходит кратковременное (5-15 минут) замедление капиллярного кровотока, которое затем сменяется интенсификацией микроциркуляции. Во время и по окончании курса магнитотерапии происходит ускорение капиллярного кровотока. Улучшение сократительной способности сосудистой стенки, и увеличение их кровенаполнения. Увеличивается просвет функционирующих компонентов микроциркуляторного русла, возникают условия, способствующие раскрытию предшествующих капилляров, анастомозов и шунтов.

Под влиянием магнитных полей происходит повышение сосудистой и эпителиальной проницаемости, прямым следствием чего является ускорение рассасывания отеков и введенных лекарственных веществ. Благодаря данному эффекту магнитотерапия нашла широкое применение при травмах, ранах и их последствиях.

При воздействии постоянного, переменного и бегущего импульсного магнитного поля отмечается усиление метаболических процессов в области регенерата кости (при переломе), в более ранние сроки появляются фибро- и остеобласты в зоне регенерации, процесс образования костного вещества происходит интенсивнее и в более ранние сроки.

При влиянии магнитных полей возникает гипокоагуляционный эффект за счет активации противосвертывающей системы, уменьшения внутрисосудистого пристеночного тромбообразования и снижение вязкости крови посредством влияния магнитных полей малой интенсивности на ферментативные процессы, электрические и магнитные свойства элементов крови, принимающих участие в гемокоагуляции.

Воздействие магнитного поля оказывает значительное влияние на обмен веществ в организме. При действии на отдельные системы организма в сыроворотке крови увеличивается количество общего белка, глобулинов и повышается их концентрация в тканях за счет  $\alpha$ - и  $\gamma$ -глобулиновых функций. При этом происходит изменение структуры белков. При кратковременных ежедневных общих влияниях на организм магнитных полей снижается содержание пировиноградной и молочной кислот не только в крови, но также в печени и мышцах. При этом происходит увеличение содержания гликогена в печени.

Под действием магнитного поля в тканях происходит снижение содержания ионов  $Na$  при одновременном повышении концентрации ионов  $K$ , что является свидетельством изменения проницаемости клеточных мембран. Отмечается снижение содержания  $Fe$  в мозге, сердце, крови, печени, мышцах, селезенке и повышение его в костной ткани. Это перераспределение  $Fe$  связано с изменением состояния органов кроветворения. При этом повышается содержание  $Si$  в мышце сердца, селезенке, семенниках, что активизирует адаптационно-компенсаторные процессы организма. Содержание  $Co$  понижается во всех органах и происходит его перераспределение между кровью, отдельными органами и тканями. Под влиянием магнитного поля биологическая активность  $Mg$  возрастает. Это приводит к уменьшению развития патологических процессов в печени, сердце, мышцах.

Отмечено, что магнитные поля небольшой индукции стимулируют процессы тканевого дыхания, изменяя соотношение свободного и фосфорилирующего окисления в дыхательной цепи. Усиливается обмен нуклеиновых кислот и синтез белков, что влияет на пластические процессы. Воздействие на пролиферацию и регенерацию определяется увеличением перекисного окисления липидов.

Характерным проявлением действия магнитного поля на организм считается активация процессов метаболизма углеводов и липидов. О последнем

свидетельствует увеличение неэстерифицированных жирных кислот и фосфолипидов в крови и внутренних органах, уменьшение холестерина крови.

Таким образом, воздействия магнитными полями непродолжительной экспозиции, обладают хотя и не столь выраженным, как другие физические факторы, но многообразным действием на организм, что способствует развитию индивидуальных обратимых благоприятных явлений. Наиболее доказанным и имеющим наибольшее значение для клиники является седативное, гипотензивное, противовоспалительное, противоотечное, болеутоляющее и трофикорегенераторное действие. При определенных условиях, а в частности при воздействии на крупные сосуды, магнитотерапия оказывает дезагрегационный и гипокоагуляционный эффекты, улучшает микроциркуляцию и регионарное кровообращение, благоприятно влияет на иммунореактивные и нейровегетативные процессы. Воздействие магнитным полем, как правило, не вызывает образования эндогенного тепла, повышения температуры и раздражения кожи. Отмечается хорошая переносимость у ослабленных больных, больных пожилого возраста, страдающих сопутствующими заболеваниями сердечно-сосудистой системы, что позволяет применять устройство во многих случаях, когда воздействие некоторыми другими физическими факторами не показано.

Несмотря на свое благотворное действие на организм, магнитные поля от 70 мТл и выше становятся стрессорными агентами и неблагоприятно сказываются на деятельности различных функциональных систем. Происходит дискоординация деятельности эндокринных органов, снижается проницаемость клеточных мембран, развивается гипоксия и дистрофические процессы. Исходя из этого необходимы строжайшее соблюдение техники безопасности и контроль за дозировкой фактора.

### **8.2.2. Показания к лечебному применению магнитных полей**

Заболевания сердечно-сосудистой системы: гипертоническая болезнь I-II степени; ИБС со стабильной стенокардией напряжения I-II ФБ; ревматизм; вегето-сосудистая дистония; постинфарктный кардиосклероз\*.

Заболевания и травмы центральной и периферической нервной системы: травмы позвоночника, спинного мозга; нарушение спинномозгового кровообращения; преходящие нарушения мозгового кровообращения\*, ишемические мозговые инсульты\*; остеохондроз позвоночника; невриты, полинейропатии различного происхождения; невралгии; неврозы, неврастения; ганглиониты; каузалгии; фантомные боли; параличи, парезы.

Заболевания периферических сосудов: облитерирующий атеросклероз I-II-III стадии; облитерирующий эндартериит I-II-III стадии; тромбангит; синдром Рейно; хроническая венозная и лимфо-венозная недостаточность; тромбоз флебит поверхностных и глубоких вен\* в подострый период; посттромбофлебитический синдром; диабетические ангиопатии, полинейропатии; состояние после аорто-бедренного шунтирования.

Заболевания и повреждения опорно-двигательного аппарата: деформирующий остеоартроз (I-III стадии в фазе обострения и ремиссии); инфекционно-токсические артриты, полиартриты различной этиологии; бурситы эпикондилиты, периартриты; замедленные консолидации переломов, в том числе при металлосинтезе, наличие гипсовой повязки или аппарата Илизарова; ушибы, растяжения сумочно-связочного аппарата, вывихи.

Заболевания бронхо-легочного аппарата: острые пневмонии затяжного течения; хронический бронхит; бронхиальная астма ( кроме гормонозависимой); туберкулез (неактивная форма).

Заболевания желудочно-кишечного тракта: язвенная болезнь желудка и 12-ти перстной кишки в фазе обострения и ремиссии; хронический гастрит, гастродуоденит; подострый и хронический панкреатит; хронический гепатит и затяжное течение острого гепатита; дискинезия желчевыводящих путей; хронический холецистит; хронический неязвенный колит; состояние после резекции желудка по поводу язвы с целью профилактики пострезекционных осложнений.

ЛОР-патология: вазомоторный ринит; хронический ринит, риносинусит; гайморит, фронтит; хронический фарингит; хронический отит; ларингит, трахеит.

Офтальмология: подострые и хронические воспалительные заболевания различных сред глаз: конъюнктивит, кератит, ирит, иридоциклит, увеит; атрофия зрительного нерва; начальная форма глаукомы.

Стоматология: парадонтоз; гингивит; язвенные поражения слизистой оболочки ротовой полости; острый артрит височно-нижнечелюстного сустава; переломы нижней челюсти; послеоперационные раны и травмы.

Можно назначать при наличии в полости рта металлических коронок, мостовидных протезов и шин.

Подострые и хронические заболевания мочеполовой системы: цистит; уретрит; пиелонефрит; аднексит, метрит, сальпингоофорит; простатит; эпидидемит, орхит, везикулит; импотенция; бесплодие; климактерический синдром; доброкачественное новообразование (миома, фибромиома) с учетом возраста, гормонального фона, динамики процесса.

Аллергические и кожные заболевания: вазомоторный ринит; бронхиальная астма; псориаз; нейродермит.

Трофические язвы: вялогранулирующие раны; ожоги, обморожения, пролежни; предоперационная подготовка и послеоперационная реабилитация; спаечная болезнь; повышение иммунного статуса.

Примечание: знаком \*) обозначены заболевания, при которых магнитотерапия назначается с учетом индивидуальных особенностей пациента, динамики заболевания, данных клинического и функционального обследования.

### **8.2.3. Противопоказания**

Абсолютные: кровоточивость и склонность к ней; системные заболевания крови; острый тромбоз; рецидивирующие, тромбэмболические осложнения; аневризмы сердца, аорты и крупных сосудов; сердечно-сосудистая недостаточность выше II стадии; стабильная стенокардия III-VI функциональный класс; тяжелые нарушения сердечного ритма (мерцательная аритмия, пароксизмальная тахикардия, частые экстрасистолы и др.); острый инфаркт миокарда; наличие кардиостимулятора; заболевания ЦНС с резким возбуждением; психические расстройства; клаустрофобия (страх замкнутого пространства при общих воздействиях); нарушения мозгового кровообращения - острый период; злокачественные новообразования или подозрение на их развитие; активный туберкулезный процесс; общее тяжелое состояние организма (легочная, сердечная, смешанная форма этих видов недостаточности II-III степени); инфекционные заболевания в острой стадии; лихорадочные состояния; резкое обострение хронического воспалительного процесса; гангрена; истощение организма; тиреотоксикоз; индивидуальная непереносимость; детям до 1,5 лет не проводят локальное воздействие, до 18 лет - общее воздействие.

Относительные: гипотония (можно проводить магнитотерапевтическое воздействие при стабильном АД и хорошей переносимости процедуры пациентом).

В практической медицине широко используются биотропные и силовые свойства различных искусственных источников магнитного поля. Их применяют для профилактики и лечения многих заболеваний, а также в целях реабилитации.

Минздравом разрешены разнообразные устройства без потребления электроэнергии и электромагнитные аппараты. В первую группу входят твердые и эластичные магниты, во вторую - аппараты, генерирующие постоянные, переменные, импульсные и другие виды низкочастотного электромагнитного поля.

### **8.2.4. Магнитные поля биологического происхождения и их использование в медицине**

Некоторые виды клеток в организме, такие как мышечные и нервные клетки, обладают собственной электрической активностью. Электрические токи, возникающие в результате этой активности, порождают магнитные поля. Измерением и изучением таких полей занимается область знаний, называемая биомагнетизм. Основной целью биомагнетизма является выявление биологических процессов, лежащих в основе электрической и магнитной активности живых тканей. Информация, полученная при изучении биомагнитных полей, не только вносит вклад в понимание фундаментальных законов функционирования живых организмов, но и дает в руки медиков полезный диагностический

инструмент. Следует отметить, что магнитные поля измеряются снаружи тела без какого-либо контакта, вследствие чего данная методика является совершенно неинвазивной и абсолютно безвредной.

Наибольший интерес у исследователей вызывают магнитные поля сердца (магнитокардиография) и мозга (магнитоэнцефалография). Однако изучаются и другие источники биомagnetных полей, такие как мышцы (магнитомиография), глаза (магнитоокулография) и др.

Биомagnetные поля очень малы. Даже магнитное поле сердца, самого сильного источника магнитного поля в человеческом организме, в миллион раз слабее магнитного поля земли, вращающего стрелку компаса. Измерение столь малых полей достаточно сложная задача, поэтому прогресс в биомagnetизме стал возможен только с появлением очень чувствительных датчиков магнитного поля, скивдов. Действие Сверхпроводящего КВантово-Интерференционного Датчика (СКВИД) основано на эффекте Джозефсона. Магнитометрами на основе скивда могут быть измерены магнитные поля до  $10^{-14}$  тесла. Первым серьезным успехом биомagnetизма стало измерение магнитной кардиограммы сердца, произведенное Д. Козном и его коллегами в 1970 году. В этом исследовании был использован скивид в качестве датчика магнитного поля, немагнитный криогенный сосуд с жидким гелием для поддержания рабочей температуры скивда во время измерений и магнитоэкранированную комнату для подавления внешних магнитных шумов. Данный набор оборудования является теперь стандартным при проведении биомagnetных измерений.

### **Измерительная аппаратура**

По сути скивид — это сверхпроводящее кольцо, имеющее одно или два слабых звена, получивших название Джозефсоновские переходы. Особенность Джозефсоновского перехода состоит в том, что существующая в нем сверхпроводимость может быть разрушена очень слабым током (типичное значение критического тока 10-100 микроампер). Сложные квантово-волновые свойства перехода впервые были описаны Б. Джозефсоном в 1962 году. Джозефсоновские переходы могут работать только при сверхпроводящих температурах, то есть несколько градусов кельвина в случае обычных низкотемпературных сверхпроводников или несколько десятков градусов кельвина в случае высокотемпературных сверхпроводников. Такие температуры обычно достигаются путем охлаждения в жидком гелии (температура кипения 4.2 градусов Кельвина) или в жидком азоте (температура кипения 77 градусов Кельвина), что вызывает определенные технические трудности. С другой стороны, работа при низких температурах, когда шумы датчика значительно снижены, позволяет достичь предельной чувствительности.

Можно упомянуть несколько интересных явлений, на которых основана работа скивда. Например, тот факт, что магнитное поле не может проникнуть внутрь сверхпроводника глубже определенной величины. Вытеснение магнитного поля из тела сверхпроводника, известное как эффект Мейснера, тесно связано с другим явлением, называемым "вмороженное поле". Представим себе сверхпроводящее кольцо, которое было помещено во внешнее магнитное

поле до наступления сверхпроводящего состояния. После удаления внешнего магнитного поля некоторая часть магнитного потока останется "вмороженной" в отверстие кольца. Более того, это вмороженное поле не может принять произвольное значение, а обязательно должно быть кратно некоторой величине, кванту потока, равному  $2.07 \times 10^{-15}$  вебер.

Конструкция современных сквидов основана на использовании тонкопленочных технологий, сходных с теми, что используются при производстве интегральных схем. Чувствительность датчиков, предлагаемых сегодня на рынке, достигает  $5 \text{ fT/Hz}^{-1/2}$ . С открытием высокотемпературной сверхпроводимости в 1986 году большие усилия исследователей были направлены на разработку высокотемпературных сквидов. Существенным преимуществом высокотемпературных сквидов является то, что жидкий азот дешевле жидкого гелия и проще в обращении. Несмотря на то, что термический шум высокотемпературных сквидов неизбежно выше, чем шум низкотемпературных сквидов, стараниями разработчиков их чувствительность вплотную приблизилась к чувствительности низкотемпературных датчиков. Однако, как показывает практика, в настоящее время большинство коммерчески выпускаемых приборов построено на основе низкотемпературных сквидов, что объясняется тем, что высокотемпературные сквиды по-прежнему считаются шумными и недостаточно стабильными.

### **Защита от магнитных шумов**

В обычных условиях биомагнитные сигналы примерно в 100.000 раз слабее внешнего магнитного шума. К естественным флуктуациям геомагнитного поля добавляются магнитные шумы многочисленных искусственных источников, таких как поезда, автомобили, линии электропередач и вибрация массивных металлических конструкций, особенно интенсивных в городских условиях. Для защиты от шумов используются всевозможные экраны.

Самым распространенным типом защиты от магнитных шумов являются ферромагнитные экраны. Их действие основано на том, что материалы с высокой магнитной проницаемостью втягивают внутрь себя магнитный поток. У контейнера, сделанного из такого материала, большая часть поля концентрируется в его стенках, а поле внутри, наоборот, ослабляется. В результате этого пространство внутри такого контейнера оказывается экранированным от внешних магнитных полей. Чем выше магнитная восприимчивость материала, тем лучше экранирующий эффект. Надо заметить, что увеличение толщины стенки в данном случае не является оптимальным решением. Обычно вместо этого используют несколько тонких экранов. В этом случае результирующий эффект равен произведению экранирующих эффектов от каждого отдельного экрана. Лучшим материалом для этих целей является Мю-металл. Он имеет магнитную проницаемость около 10 и способен обеспечивать хорошее экранирование в широком частотном диапазоне, однако очень дорог и труден в обращении.



Более простым решением является экран, изготовленный из материала с высокой электропроводностью. Внешние переменные магнитные поля наводят токи в стенках такого экрана. Магнитное поле, производимое этими токами, противоположно по направлению, вызвавшему его внешнему полю и частично его компенсирует. Эффективность таких экранов зависит от частоты, и на частотах ниже одного герца экранирующий эффект практически отсутствует. В отличие от ферромагнитных экранов, в данном случае предпочтительнее использовать один толстый слой материала с высокой проводимостью. Такие экраны обычно делаются из алюминия толщиной в несколько сантиметров.

Ещё один метод борьбы с шумами называется активная компенсация шума. Внешнее возмущение измеряется датчиком, который управляет током в специальных катушках.

Эти катушки создают магнитное поле той же силы, что и возмущение, но противоположного направления. В результате в зоне действия этих катушек магнитное возмущение компенсируется. Для этой цели обычно используются катушки Геймгольца — пара одинаковых соосных катушек, удаленных друг от друга на расстояние равное их радиусу. Активная компенсация эффективна только на очень низких частотах (0–1 герца).

Ведущие биоманитные лаборатории оснащены магнитоэкранированными комнатами, сочетающими в себе все три вышеперечисленных метода. Такие комнаты могут выглядеть изнутри как нормальный медицинский кабинет. Мировой рекорд коэффициента экранировки установлен магнитоэкранированной комнатой, построенной в Берлинском физико-техническом институте. В этой комнате достигнут уровень экранирования  $2 \times 10^6$  на частоте 0,01 герц, что в жестких условиях большого города обеспечивает уровень шума, сходный с собственными шумами сквида.

Сверхпроводящие экраны обеспечивают гораздо лучшее ослабление внешних полей, чем все другие способы. В Японии уже испытан цилиндрический экран диаметром 90 см и длиной 2 метра. В него помещается человек и многоканальный сквид-магнитометр. Внутри такого экрана магнитные шумы практически отсутствуют.

## **Магнитокардиография**

Магнитокардиография измеряет магнитные поля, вызванные электрическим возбуждением сердца. У взрослого человека магнитный сигнал сердца на поверхности тела имеет величину порядка 100 пикатесла.

На первый взгляд магнитокардиограмма выглядит очень похожей на всем известную электрокардиограмму. ЭКГ, широко используемая в клинической практике уже более полувека и являющаяся стандартным методом диагностики сердечных заболеваний, основана на измерении электрических потенциалов на поверхности тела, вызванных электрическими токами, возникающими в результате возбуждения сердечной мышцы. Преимущества магнитокардиографии становятся очевидными при картировании сердечных сигналов с ис-

пользованием больших массивов приемных датчиков. Магнитокардиограмма обладает большим пространственным разрешением, так как ткани тела, находящиеся между сердцем и датчиком, слабо влияют на магнитное поле сердца. В то же время, электрические токи, генерируемые сердцем, должны пройти сквозь несколько слоев с сильно различающейся электрической проводимостью, таких как околосердечная сумка, перикардальная жидкость и соединительная ткань. Это заметно искажает и смазывает распределение потенциалов на поверхности кожи, уменьшая пространственное разрешение ЭКГ. Другим важным отличием магнитокардиографии от электрокардиографии является тот факт, что вихревая компонента тока в ткани не создает электрических потенциалов на поверхности, но в то же время может порождать ощутимое магнитное поле. Эти преимущества делают МКГ более надежным инструментом для диагностики ишемической болезни сердца и различных аритмий.

## **Магнитоэнцефалография**

Магнитоэнцефалография изучает магнитные поля, создаваемые нейронной активностью человеческого мозга. Эти поля чрезвычайно малы, и не превышают  $10^{-13}$  тесла. Они создаются преимущественно пирамидальными нейронами коры головного мозга. Электрический ток в ткани мозга создается потоками ионов, сопровождающих работу нейронов. Однако ток, созданный отдельным нейроном, не способен породить сколько-либо заметное магнитное поле. Подсчитано, что для того, чтобы получить магнитное поле, которое можно измерить современными сквидами на минимальном расстоянии от головы, требуется 50000 одинаково ориентированных и работающих синхронно пирамидальных нейронов. Как и в случае с сигналами сердца, казалось бы магнитоэнцефалограмма несет ту же информацию, что и электроэнцефалограмма ЭЭГ (измерение электрических потенциалов при помощи электродов помещаемых на поверхность скальпа). Однако между ними существуют принципиальные отличия. Мозг человека окружен тремя защитными слоями - спинномозговая жидкость, череп и кожная ткань. Эти ткани имеют существенно разную электропроводность. Так спинномозговая жидкость обладает очень хорошей проводимостью, в то время как проводимость черепной кости довольно низка. Такая структура ослабляет токи, протекающие через скальп, смазывает их локальные вариации и таким образом уменьшает пространственное разрешение ЭЭГ. Кроме того, дополнительные неудобства вызывает наличие кожно-электродного контакта. Магнитное поле, напротив, не подвержено влиянию проводимости среды. В связи с этим точность определения местоположения источников электромагнитной активности при помощи магнитоэнцефалографии приближается к точности, достижимой при измерении электрических потенциалов на открытом мозге. Другое важное отличие между электро- и магнитоэнцефалографией состоит в ориентации клеток, поле от которых мы способны измерить. Клетки, сориентированные параллельно поверхности черепа, порождают магнитные поля, силовые линии которых выходят за пределы проводника (мозга) и достигают датчиков. Клетки же, сориентированные

вдоль радиуса головы, порождают магнитные поля, которые взаимообнуляются под действием связанных с ними объемных токов. Такие клетки невидимы для магнитных датчиков. Для ЭЭГ, напротив, видимы только радиально сориентированные клетки и невидимы тангенциально сориентированные.

В клинической практике магнитоэнцефалография чаще всего используется для определения местоположения эпилептической активности. Если требуется хирургическое удаление очага эпилепсии очень важно точно установить источник, чтобы уменьшить риск удаления здоровой мозговой ткани. При этом другие диагностические методы, такие, например, как магниторезонансная томография, не всегда способны увидеть пораженную область. Кроме того, в ряде случаев, видимая на томографическом изображении опухоль может не точно совпадать с очагом эпилепсии. При локализации таких областей магнитоэнцефалография показала себя более точной, чем ЭЭГ. Еще одной признанной областью применения магнитоэнцефалографии в медицине является предоперационное картирование коры мозга. Здесь магнитоэнцефалография успешно соревнуется со стандартной методикой, включающей в себя наложение измерительной сетки из электродов на открытую поверхность мозга.

## **Магнитные поля плода человека**

Еще одним важным разделом биомagnetизма является изучение магнитных полей плода в ходе беременности. Электрические процессы в развивающемся мозге и сердце представляют огромный интерес. Магнитоэнцефалограмма и магнитокардиограмма плода могут служить как для контроля нормального его развития, так и использоваться для диагностики возможных отклонений.

Магнитокардиография плода имеет ряд преимуществ по сравнению с ЭКГ плода (измерение электрической активности сердца плода при помощи электродов, устанавливаемых на животе матери). Во-первых, не требуется контакт с телом матери. Во-вторых, магнитные сигналы плода гораздо меньше подвержены помехам со стороны материнской сердечной активности, так как магнитное поле ослабевает с расстоянием быстрее, чем электрическое. В-третьих, магнитное поле гораздо меньше зависит от вариаций проводимости тканей и достигает поверхности тела почти без искажений.

В настоящее время при помощи магнитокардиографии возможна диагностика различных форм аритмии плода. В настоящее время доплеровская ультразвуковая диагностика считается золотым стандартом при анализе сердечных отклонений у плода и, в частности, аритмий. Она дает информацию о механических процессах, сопровождающих работу сердца. Магнитокардиография, со своей стороны открывает доступ к электрофизиологии аритмий.

Магнитоэнцефалография плода является уникальным методом, позволяющим зарегистрировать электрофизиологическую активность мозга плода. Магнитные поля, создаваемые мозгом плода, чрезвычайно слабы (10 фемтатесла). Их очень трудно зарегистрировать из-за сильного влияния других источников, таких как сердце и мускулы матери и самого плода. Исследования

магнитных полей мозга плода возможны только в условиях магнитной экранировки и с использованием многоточечных измерительных систем, так как очень велика вероятность потери сигнала из-за движений плода. Кроме этого, необходимы специальные методы пространственной и временной фильтрации для точного выделения полезного сигнала. Уже сделаны первые успешные попытки записать магнитные отклики мозга плода на звуковой стимул.

Биомагнетизм — это развивающаяся область исследований с непрерывно растущим числом решаемых задач. Некоторые из разработанных методик уже доказали свою нужность и находятся в стадии клинической апробации. Кроме того, биомагнетизм вносит фундаментальный вклад в понимание электрофизиологических процессов, происходящих в организме и в особенности в мозге.

## **Магнитная терапия**

В настоящее время трудно сказать, кто был тем человеком, кто первый начал использовать магниты в лечебных целях, и когда это было. История магнитной терапии — лечения человека и животных с помощью магнитного поля — насчитывает столетия.

Этот способ лечения давно сосуществует с традиционной медициной, хотя до сих пор среди ученых и практикующих врачей нет однозначного мнения о его действенности или бесполезности. Исследования продолжаются как в научных, так и в лечебных учреждениях, а применение продуктов магнитной терапии в мире продолжает возрастать. Все более развивающаяся индустрия производства магнитных браслетов, поясов, стелек, подтяжек, матрасов, и т. д. Косвенно свидетельствует о чудотворной силе всех этих продуктов. Мировой объем рынка продуктов магнитной терапии в настоящее время может быть оценен в сотни миллионов долларов ежегодно.

Множество научных и лечебных лабораторий и институтов США, Японии, Германии, Швеции занимаются проблемами магнитной терапии, но тема далека от закрытия.

## **Магнитные Поля и Тело человека**

Влиянию электромагнитных полей на тело человека и животных посвящено великое множество статей, однако, в большинстве из них описаны эффекты, оказываемые полями радио- и микроволновой частоты или, в последние годы, промышленной частоты (50-60 Гц). Исследования биологических эффектов постоянных магнитных полей сконцентрированы на больших полях уровня полей в приборах MRI (магнитно-резонансные томографы), обычно составляющих несколько Тесла (несколько десятков тысяч Гаусс). К сожалению, исследования воздействия полей, типичных для продуктов магнитной терапии, большинство из которых ограничено несколькими сотнями Гаусс даже на поверхности магнита, весьма малочисленны. Тем не менее, основные механизмы воздействия магнитных полей на биологические организмы, позволяющие развивать магнитную терапию, известны. Эти механизмы включают в себя:

1) увеличение кровотока в результате возросшего содержания кислорода (оба

эти явления лежат в основе способности организма к самовосстановлению); 2) изменение скорости миграции ионов кальция, в результате чего, с одной стороны, кальций быстрее поступает в сломанную кость, и она быстрее срастается, а с другой стороны, кальций быстрее вымывается из больного пораженного артритом сустава; 3) изменение кислотно-щелочного баланса ( $pH$ ) различных жидкостей в теле человека и животных (дисбаланс часто является следствием болезни); 4) изменение выработки гормонов эндокринными железами; 5) изменение ферментной активности и скоростей различных биохимических процессов, 6) изменение вязкости крови.

Человеческое тело с магнитной точки зрения представляет собой инертный материал, каковым является его основное содержание — вода.

Под воздействием магнитного поля химическая структура воды не меняется, но изменяется морфология и сила сцепления ряда примесей. Как известно, при магнитной обработке воды кальциевые примеси ( $CaCO_3$ ) теряют способность выпадать в осадок в виде плотного камня и кристаллизуются в виде мелкодисперсной взвеси. При контакте воды, подвергшейся магнитной обработке, с уже выделившимися солями происходит их частичное растворение, а также разрушение до состояния мелкого легкоудаляемого шлама, который улавливается стандартными фильтрами очистки от механических примесей.

Магнитная обработка воды, таким образом, имеет безусловно техническое (защита котлов, трубопроводов, бойлеров и т.п.) значение, а не лечебное.

Это лишь подтверждает, что магнитное поле может влиять на процессы нуклиации в организме человека. В целом вода диамагнитна, т.е. слабо отталкивается магнитными полями. Под действием магнитного поля электроны молекул воды могут слегка корректировать свое движение, создавая при этом магнитное поле противоположного направления, примерно в 100,000 раз меньше приложенного. При удалении магнитного поля электроны возвращаются на свои первоначальные орбиты, и молекулы воды снова становятся немагнитными.

Известно, что многие покровители магнитной терапии предлагают к использованию в лечебных целях "намагниченную воду", — вряд ли это возможно. Хотя вода и реагирует на приложенное поле, но эта реакция весьма слаба, к тому же она тут же практически пропадает, как только поле удаляется. Однако полностью отрицать возможность воздействия сильного магнитного поля на структуру молекул было бы также неправильным.

Диамагнетизм воды и большинства физиологических жидкостей очень слаб. Тем не менее, недавно была продемонстрирована магнитная левитация (парение) не только капель воды, но также цветков, кузнечиков и маленьких лягушек (Berry и Geim 1997) в очень сильном поле, производимом электромагнитом в 160,000 Гаусс (16 Тесла). Эти "летающие лягушки" были показаны в средствах массовой информации по всему миру, но они лишь подтверждают правило: большинство слабых магнитных полей, которые используются в устройствах магнитной терапии, могут вызывать лишь диамагнитные силы в тысячи раз слабее гравитационных.

Некоторые авторы утверждают также, что магнитные поля притягивают кровь, ссылаясь на железо, которое она содержит. Однако, железо крови очень сильно отличается от металлического железа, которое является сильным магнетиком благодаря кооперативным эффектам, объединяющим индивидуальные атомные магнитные моменты — явлению ферромагнетизма. Свойства ферромагнитного материала являются результатом совместного поведения многих магнитных атомов, действующих в унисон. Атомы железа в крови содержатся не изолированно, а входят в состав больших молекул гемоглобина, расположенных внутри красных кровяных телец. Хотя каждый из атомов железа магнитный, он находится на значительном удалении от остальных атомов, остается слабообменно связанным с другими атомами  $Fe$ , и, следовательно, в значительной мере магнитно-независимым.

Исследования влияния сильного статического магнитного поля на кровь человека проводились многократно с помощью таких методов, как ядерный магнитный резонанс (*NMR*), магнитная томография (*MRI*). Еще в 1936 году ученые Поулинг и Кориел сообщили о диамагнитной восприимчивости оксигемоглобина (т.е. обогащенной кислородом крови) и парамагнитной восприимчивости деоксигемоглобина (т.е. крови бедной кислородом). В ходе этих исследований удалось оценить, в частности, величину эффективных магнитных моментов комплекса  $Fe^{+2}$  который входит в состав гемоглобина крови человека. 10 лет назад (1993) Хигаши и соавторами исследовали ориентацию нормальных эритроцитов крови в сильном постоянном магнитном поле с максимальной величиной до 8 Тесла. Было обнаружено, что эритроциты ориентируются таким образом, чтобы плоскость их диска была параллельна направлению приложенного поля. Наконец, в 1997 году американские исследователи Хайк и Чей из Университета Флориды изучили различные аспекты воздействия сильных постоянных магнитных полей на кровь человека, а именно: на магнитную восприимчивость, магнитодвижущую силу и вязкость.

Магнитная восприимчивость крови измерялась с использованием СКВИД-магнетометра. Было обнаружено, что кровь ведет себя как диамагнитная жидкость, когда она обогащена кислородом (в артериях) и как парамагнитный материал, когда она обескислорожена (в венах). На рис. 8.2.1 и 8.2.2 представлены результаты измерения магнитной восприимчивости крови в артериях (1) и венах.

В ходе экспериментов величина прилагаемого магнитного поля варьировалась от +5 Тесла до -5 Тесла, с шагом 0.5 Тесла. Исследуемые зависимости, как следует из рисунков, имеют линейный характер. Для крови бедной кислородом (венозной) восприимчивость представляет собой прямую с положительным наклоном  $(3.5) \cdot 10^{-6}$ , для крови, богатой кислородом (артериальной) - восприимчивость имеет отрицательный наклон, равный  $(-6.6) \cdot 10^{-6}$ . Следует отметить, что при слабых магнитных полях, обычно применяемых в целях магнитной терапии, намагниченность крови ничтожно мала. Кровь, как и вода, слабо отталкивается магнитными полями, а не притягивается.

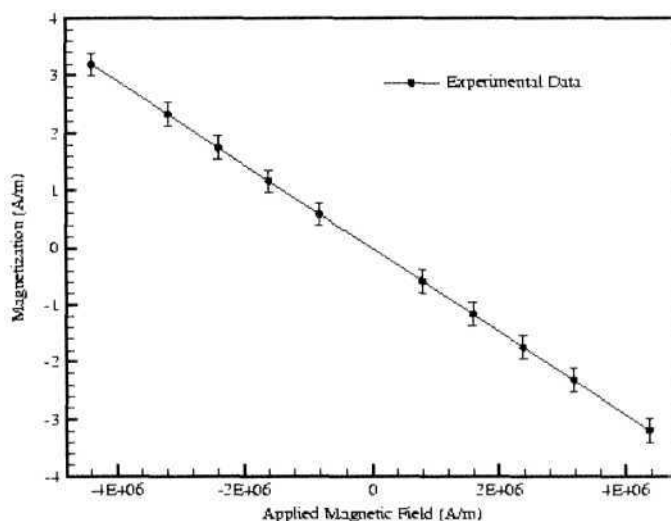


Рис. 8.2.1. Магнитная восприимчивость крови, обогащенной кислородом

Исследовалось также влияние магнитного поля на вязкость крови. Было обнаружено, что течение крови замедляется в присутствии поля. Результаты эксперимента представлены на Рис. 8.2.3.

В серии экспериментов обнаружено, что замедление движения крови достигает 25%, если величина приложенного поля составляет 10 тесла. При значении поля в 1 Тесла (характерная величина для MRI - устройств), вяз-

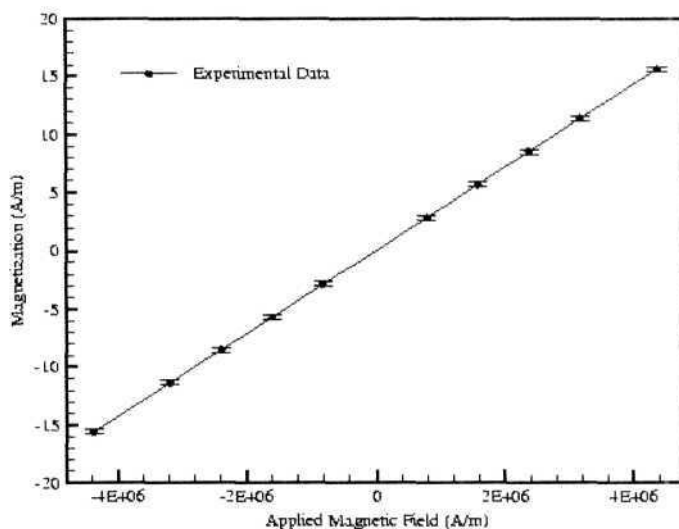


Рис.8.2.2. Магнитная восприимчивость крови, бедной кислородом

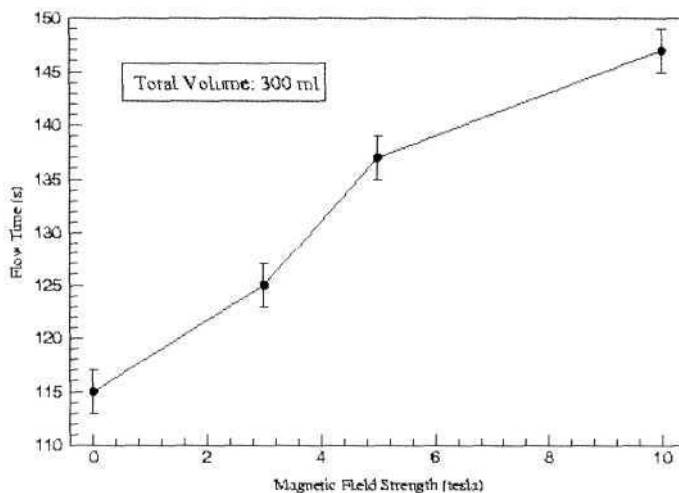


Рис. 8.2.3. Вязкость крови

кость меняется менее чем на 0.3 %, что не позволяет рассчитывать на сколько-нибудь значительный эффект.

Хотя большинство компонент человеческого тела и других живых организмов являются слабо диамагнитными, обнаружено, что многие организмы содержат в небольших количествах сильно магнитные материалы, обычно магнетиты ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ). Наиболее интересный случай — это магнитотактическая бактерия, содержащая такое количество магнитных частиц, что они вызывают ориентацию бактерии по линиям магнитного поля Земли. Кристаллы магнетитов присутствуют также в теле голубя, пчел, многих млекопитающих, и даже в мозгу человека. Тем не менее кажется совершенно невероятным, чтобы присутствием столь малых количеств магнетитов в теле человека можно было объяснить эффект магнитной терапии. Однако, если частицы магнетита расположены в определенном месте, они могут локально усиливать эффекты слабых магнитных полей, например, изменять поток ионов через мембраны клеток, или тип электрического пропускания нервных клеток.

### Доказательства и сомнения, адвокаты и скептики

"Я не знаю ни одного ученого, кто относился бы к этим заявлениям серьезно... Это прихоть, навязчивая идея. Но все эти магнитные вещи получили такое же хождение, как медные браслеты и кристаллы, и они могут стать еще популярнее" — Роберт Парк, член Американского Физического Общества.

"Атомы железа в магните плотно прижаты друг к другу. В вашей крови в каждой молекуле гемоглобина содержится четыре атома железа, и они разделены между собой расстоянием слишком большим для образования магнита.



Это легко проверить — уколите свой палец и поместите каплю крови рядом с магнитом" — Михаил Шермерс, физик

Долгое время считающаяся шарлатанским направлением медицины, в наше время магнитная терапия получила научную поддержку в результате исследований в Медицинском колледже Бейлора (США, 1997). Внушают ли доверие эти исследования? Результаты исследований, о которых идет речь, были опубликованных в 1997 году в Архивах Физической и Реабилитационной Медицины.

Исследования проводились доктором Карлосом Валбона на 50-ти постполиомиелитных больных в Реабилитационном Центре Бейлоровского Института Хьюстона. Магниты для исследований (многополярные, циркулярные) предоставила компания Bioflex, Inc., она же произвела набор визуально идентичных поддельных магнитов для контроля. Для того чтобы результаты исследования были достоверными, никто из пациентов не знал, какие из магнитов были настоящими, а какие поддельными. До и после 45-минутного периода магнитной терапии пациентам предлагалось оценить свою боль по 10-балльной шкале. 29 пациентов, которые пользовались настоящими магнитами, сообщили, в среднем, о значительном уменьшении боли (от 9.6 до 4.4), в то время как пациенты, пользующиеся подделками (21 человек), сообщили о значительно меньшем уменьшении боли (от 9.5 до 8.4). Это различие является существенным, и не может объясняться эффектом плацебо.

Однако для твердых скептиков некоторые сомнения все же остаются и после этих исследований. И доктор Валбона, и его коллега доктор Карлтон Хазлвуд сообщили об их личном удачном опыте использования магнитов для снятия боли в колене, повышая тем самым сомнение в их объективности. Сознательные или несознательные систематические ошибки исследователей могут быть очень незначительными и не оказывать влияния на результаты исследований. Серьезная трудность — возможность отличить настоящий магнит от подделки, другая трудность любых подобных исследований - субъективность полученных данных.

Несмотря на все эти причины для осторожности результаты исследований в Бейлоре внесли изменения в точку зрения многих физиков. Так, доктор Вильям Джарвис, президент Национальной комиссии по мошенничеству в медицине, ранее считал магнитную терапию существенно шарлатанским методом. Сейчас он в порядке эксперимента допускает, что она может быть полезна при лечении постполиомиелитных больных.

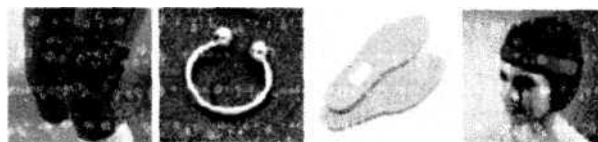
Многие средства массовой информации, пишущие на эту тему, не делают должного различия между формой магнитной терапии, изучаемой в колледже Бейлора, основанной на действии умеренных статических полей от постоянных магнитов, и более распространенной формой магнитной терапии, основанной на сильных импульсных полях электромагнитов. Импульсные магнитные поля существенно отличаются от постоянных, поскольку, в соответствии с уравнениями Максвелла, изменяющееся во времени магнитное поле индуцирует электрическое поле. Электрические поля оказывают выраженное воздей-

ствие на биологические процессы, в частности, на нервные и мускульные клетки, о чем мы знаем еще со времен Гальвани и его опытов с ножками лягушек. Много лет назад FDA (Управление по контролю за продуктами и лекарствами США) одобрило использование импульсных магнитных полей в "стимуляторах роста костей" для лечения плохо срастающихся переломов и "магнитной стимуляции" -- воздействия импульсных полей на мозг и другие компоненты нервной системы. В настоящее время подобные работы ведутся весьма интенсивно. В частности, показано, что при лечении депрессии многообещающим средством является транскраниальная (внутричерепная) магнитная стимуляция, при которой пациент получает сотни импульсов магнитного поля величиной до 1 Тесла и более длительностью в миллисекунду каждый. Однако, подобные формы магнитно-импульсной терапии основаны на биологических эффектах от индуцируемых электрических полей, и в корне отличаются от терапии с применением статических полей постоянных магнитов.

### 8.2.5. Магнитная терапия сегодня

Журнал Time недавно сообщил о возросшем использовании магнитов знаменитыми гольфистами, футболистами и другими профессиональными спортсменами для снятия боли. Магнитные продукты для снятия боли в настоящее время продаются во многих магазинах для спорта, их реклама появляется в спортивных журналах. Наибольшее применение магнитная терапия имеет в Японии и Китае, однако, и в США и Европе она занимает все более значимое место как часть нетрадиционной медицины. Многие производители рекомендуют применение магнитных заплаток непосредственно в местах локализации болей, другие предлагают прикладывать маленькие магниты к акупунктурным точкам. Магнитные ремни, содержащие 16 или более магнитов, претендуют на облегчение болей в спине, подобные магнитные "обертки" предлагается прикладывать почти ко всем частям тела, включая кисти, запястье, локти, колени, лодыжки, и ступни (магнитные стельки особенно популярны). При головной боли Вы можете надеть на голову магнитные ленты, магнитные кольца в уши, или магнитные ожерелья на шею.

Многие магнитные ожерелья, браслеты, и серьги выполнены из богатых серебром и золотом магнитных сплавов, при этом покупателям обещается и эстетический, и терапевтический эффект. В одном каталоге утверждается, что магнитные клипсы "стимулируют нервные окончания, которые могут регули-



ровать головную боль и боль в шейном отделе позвоночника", а магнитные браслеты "действуют на биополе человека" и "корректируют энергетический дисбаланс, создаваемый действием электромагнитных полей и атмосферных явлений". Другие магнитные идеи — амортизационные прокладки для сидений автомобиля, магнитные подушки и матрасы, обеспечивающие "специальное поле для сна", и даже специальное комфортное магнитное устройство для борьбы с простатитом у пожилых мужчин!

Магнитная терапия также широко применяется в лечении породистых гоночных лошадей. Магнитные накладки при самых различных проблемах с ногами, магнитные попоны, магнитные подушки в подковы, и т.д., все это получило поддержку многих тренеров и даже ветеринаров. Поклонники магнитной терапии справедливо утверждают, что эффект плацебо не может проявляться у лошадей и других животных, но они забывают о том, что интерпретируют результаты лечения люди. Последний факт оставляет место для сомнений.

Действенность магнитной терапии (как и другого медицинского лечения, традиционного или альтернативного) не зависит от нашего понимания биологических механизмов. Тем не менее, большинство производителей предметов магнитной терапии понимают необходимость получения привлекательного объяснения причин их действенности.

Уже предложено значительное количество механизмов действия, которые призваны объяснить терапевтические эффекты от действия магнитов. Это улучшение циркуляции крови, изменение прохождения нервных импульсов, увеличение содержания кислорода в крови и увеличение щелочного состава физиологических жидкостей, магнитное влияние на движущиеся ионы, уменьшение отложений на стенках кровеносных сосудов и др.

Однако, научных доказательств справедливости всех этих предположений не существует.

Наиболее нетрадиционное объяснение представлено доктором Киочи Нмакагава из Японии, который утверждает, что многие из современных болезней являются результатом "синдрома дефицита магнитного поля". Известно, что магнитное поле Земли уменьшилось на 6 процентов с 1830 года, и косвенные свидетельства утверждают, что оно уменьшилось более чем на 30 процентов за последнюю тысячу лет. Нмакагава аргументирует эффективность магнитной терапии простым восполнением нехватки земного магнитного поля.

## **Окончательные выводы преждевременны**

Терапевтический эффект, оказываемый постоянными магнитами, в настоящее время все еще рассматривается со значительной долей скептицизма. Большинство результатов многочисленных исследований эффективности магнитной терапии может быть списано на эффект плацебо. Например, магнитные накладочки для спины, используемые многими профессиональными гольфистами, по всей вероятности, помогают снимать боль в спине благодаря осуществляемой ими чисто механической поддержке, локальному нагреванию спины,

а также благодаря тому, что их присутствие напоминает немолодым спортсменам, что им не следует слишком перенапрягать свои мышцы. Все эти устройства работают как с магнитами, так и без них. Исследования английских ученых по поводу эффективности действия магнитных стимуляторов для роста костей, показали, что стимуляция в равной степени успешна и в том случае, когда магнитное поле отключено, и связано это с навязанной пациенту при использовании стимулятора неподвижностью, а не с действием магнитных полей.

Наиболее "сильные" утверждения магнитной терапии, такие как возможность исцеления от рака путем навешивания на шею супермагнитов, не только бесполезны, но могут быть и опасны, поскольку они отвлекают пациентов от поисков правильного и адекватного медицинского лечения. Хотя до конца характер воздействия магнитного поля на раковые клетки нельзя считать изученным, некоторые утверждают, что магнитные драгоценности и большинство других продуктов для магнитной терапии вероятно безвредны, за исключением денежных потерь при покупке.

Результаты исследований в Бейлоре, однако, увеличили вероятность того, что, по крайней мере в некоторых случаях, местное применение постоянных магнитов действительно может снимать боль. Однако, эти выводы не могут считаться окончательными до тех пор, пока они не будут подтверждены дальнейшими испытаниями. Механизмы подобного воздействия остаются таинственным, но влияние статических магнитных полей на сложные электрохимические процессы в организме человека не является невозможным.

#### Магнетизм и медицина: достижения и перспективы

Если обоснованность применения магнитной терапии до сих пор остается под вопросом, то существует очень широкий круг медицинских приборов и устройств, методов диагностики и лечения, способов борьбы с различными медицинскими проблемами, в которых магнитные явления и свойства магнитных материалов не только с успехом используются, но это использования является научно оправданным. Другие идеи по использованию магнитов в медицине только начинают воплощаться в жизнь, но их перспективность уже очевидна.

Остановимся на наиболее существенных направлениях применения в медицинских целях магнитов и магнитных явлений.

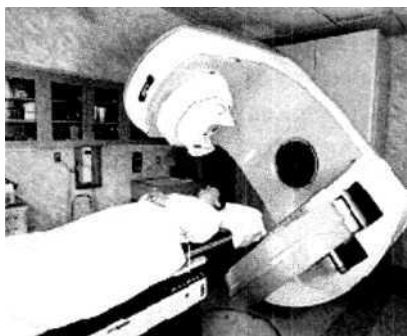
### **8.2.6. Магнитно-резонансная томография**

Магнитно-резонансная томография (ядерно-магнитная резонансная томография, МРТ, ЯМРТ, NMR, MRI) — нерентгенологический метод исследования внутренних органов и тканей человека. Здесь не используются рентгеновские лучи, что делает данный метод безопасным для большинства людей. Обследуемая часть тела пациента помещается в однородное импульсное магнитное поле большой интенсивности. Различные ткани тела человека поглощают поле в различной степени, что позволяет при помощи компьютерной

обработки создавать визуальную картину тела пациента. Технология МРТ достаточно сложна: используется эффект резонансного поглощения атомами электромагнитных волн. Человека помещают в магнитное поле, которое создает аппарат. Молекулы в организме при этом разворачиваются согласно направлению магнитного поля. После этого радиоволной проводят сканирование. Изменение состояния молекул фиксируется на специальной матрице и передается в компьютер, где проводится обработка полученных данных. В отличие от компьютерной томографии МРТ позволяет получить изображение патологического процесса в разных плоскостях. Магнитно-резонансный томограф по своему внешнему виду похож на компьютерный. Исследование проходит так же, как и компьютерная томография. Стол постепенно продвигается вдоль сканера. МРТ требует больше времени, чем КТ, и обычно занимает не менее 1 часа (диагностика одного раздела позвоночника занимает 20-30 минут).

Недавние успехи в конструкции МР — томографов позволили разработать малые по размерам, портативные устройства, с помощью которых можно обследовать такие небольшие части тела, как руки и ноги. Большие закрытые устройства для обследования всего тела, вызывающие у многих пациентов клаустрофобию, заменены в настоящее время на новые, имеющие открытую конструкцию, что оставляет пациентам свободу в ходе обследования и избавляет их от ненужных страхов.

МРТ лучше других диагностических методов визуализирует некоторые структуры головного и спинного мозга, а также нервные структуры. В связи с этим она чаще используется для диагностики повреждений, опухолевых образований нервной системы, а также в онкологии, когда необходимо определить наличие и распространенность опухолевого процесса. Список заболеваний, которые можно обнаружить с помощью МРТ, внушительный: воспалительные, дистрофические и опухолевые поражения сосудов и сердца, органов грудной и брюшной полости, поражение лимфатических узлов, паразитарные процессы и другие патологии. Метод особенно эффективен для изучения динамических процессов (например, состояния кровотока и результатов его нарушения) в органах и тканях.



### **8.2.7. Магнитная стимуляция - помощь при лечении психических расстройств**

Современные ученые-медики на практике возвращаются к использованию магнитов для лечения психических заболеваний — от депрессии до шизофрении.

Начиная с 1995 года транскраниальная (внутричерепная) магнитная стимуляция (TMS) используется в больницах Соединенных Штатов, Европы и

Австралии вначале как экспериментальный метод, а затем в качестве обычной лечебной процедуры.

В ходе этой процедуры для изменения работы больного мозга используются мощные переменные магнитные поля. При проведении процедуры магнитной стимуляции используется специальный прибор — металлическая коробка размером с настольный компьютер. К прибору с помощью кабеля присоединен тяжелый металлический предмет, похожий на ракетку для пинг-понга.

От этой ракетки исходит плотно сфокусированное магнитное поле, достаточно мощное для того, чтобы чувствоваться на расстоянии руки. Если ракетка расположена напротив черепа пациента, при включении-выключении магнитного поля в мозгу пациента создается электрический ток, таким же образом, как движущийся магнит создает ток в катушке.

Ученым-медикам удалось правильно подобрать место расположения магнита, при котором создаваемый им ток очень эффективен при лечении депрессии. Улучшение при этом виде заболевания составляет по наблюдениям не менее 50 %.

Магнитная стимуляция также с успехом используется при навязчиво-компульсивном расстройстве, биполярном расстройстве и эпилепсии, в последнее время TMS — терапию стали успешно применять и при лечении шизофрении.

Ученые не пришли к единому мнению о механизме действия прибора для TMS. Вероятнее всего, что электрический ток, создаваемый магнитами, заставляет нейроны в облучаемой части мозга становиться более возбудимыми.

Трудновозбудимые нейроны требуют относительно большого количества электричества, чтобы стать активными. Если удастся повысить возбудимость нейронов до нормального уровня, это позволит избавиться от депрессивных симптомов.

Этот принцип действия подобен электрошоковой терапии. Но при электрошоке для передачи электричества пациенту необходимо большое количество энергии. Электрошок требует общей анестезии и может вызвать конвульсии, беспокойство и временную потерю памяти.

Прибор TMS генерирует ток непосредственно в мозгу пациента, что позволяет врачам использовать значительно меньшие уровни энергии. Самый тяжелый побочный эффект от такой процедуры - умеренная головная боль.

### **8.2.8. Обзор применения магнитов в медицине**

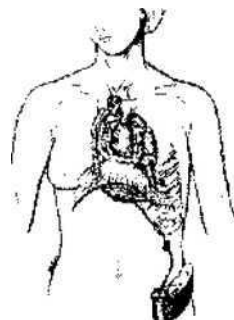
#### **Моторы на постоянных магнитах для сердечников**

Остановка сердца является наиболее частой причиной смерти в современном мире. Единственное действенное лечение для больных с хронической сердечной недостаточностью — трансплантация сердца. Однако, число подходящих для пересадки донорских органов столь мало по сравнению с количест-

вом нуждающихся в этой процедуре больных, что надеяться только на этот метод нельзя.

Однако, большинству пациентов с тяжелой формой сердечной недостаточности, у которых работает только левый желудочек сердца, можно помочь. Для этого достаточно восстановить кардиоваскулярные функции сердца до нормального уровня.

В настоящее время для этих целей рядом фирм выпускаются вращательные насосы для поддержания физиологической циркуляции крови на постоянных магнитах. Такие насосы могут быть устроены по принципу центрифуги, использовать аксиальный



(осевой) ток крови или представлять собой гибрид этих двух конструкций.

При создании насосов для обеспечения циркуляции крови используются высокоскоростные моторы на редкоземельных магнитах (чаще всего неодим-железо-бор). Они являются достаточно эффективными для обеспечения нужной температуры (кровь должна иметь температуру около 37 градусов Цельсия) и максимального продления срока действия батареек. Мотор и сам насос изготавливаются максимально компактными для удобства их использования больными.

### **Магниты как проводники и манипуляторы для медицинских процедур**

Магниты в последнее время все чаще используются для более точного и менее инвазивного введения в организм больного человека различных инструментов и лекарств в ходе лечебных и диагностических процедур. Управление движением в этом случае осуществляется с помощью магнитного поля.

### **Магниты помогают бороться с заболеваниями мозга**

Недавно в Вашингтоне была успешно выполнена следующая нетривиальная процедура — тонкий провод с крошечным магнитом на конце был введен в паховую артерию пациента, что проложило таким образом путь к его мозгу. С помощью шлемовидного магнита, окружающего голову больного, врач смог провести провод по кровеносным сосудам мозга через все их изгибы, и в конечном итоге достичь причины заболевания (ухудшения зрения): сильно увеличенных кровеносных сосудов. Несколько шприцев клея для блокировки излишнего кровотока, и провод извлечен — операция завершена, зрение восстановлено. В существующей практике лечение подобных заболеваний требует оперативного вмешательства - а именно, просверливания отверстия в черепе пациента. Однако недавно удалось разработать новый способ определения состояния мозга без непосредственного вмешательства.

[illegible][illegible][illegible][illegible][illegible][illegible][illegible][illegible]



Моран. "Большинство людей скорее позволят нам лечить свои заболевания путем проникновения в кровеносные сосуды, чем с помощью операции на своей голове".

## **Магнитная жидкость поможет сохранить зрение**

Американские исследователи утверждают, что в ближайшем будущем можно будет предотвратить слепоту у людей с поврежденной сетчаткой, используя магнитную жидкость. Сетчатка — это тонкий, светочувствительный слой ткани на задней поверхности глаза. Если она повреждается или отслаивается в результате травмы или болезни, зрение ухудшается и может наступить слепота. Обычно для возвращения поврежденной сетчатки на место используется силиконовая жидкость, но американские исследователи обнаружили, что лучшим образом может решить эту проблему намагниченная жидкость.



Действительно, такой метод значительно более точен, поскольку он позволяет жидкости двигаться под действием внешнего магнита и достигать таких участков глаза, которые трудно достижимы другими способами.

До сих пор испытания нового материала проходили только в лаборатории, но ученые, которые занимаются этой проблемой уже 10 лет, надеются, что в течение года начнутся испытания на животных, а несколько позже — клинические исследования на человеке.

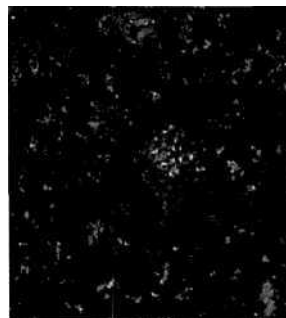
По новой технологии ультрамалые частички кобальта или магнитного железа смешиваются с жидкостью на основе силикона, которая становится магнитной и может быть подвергнута воздействию внешнего магнитного поля. Кобальт может быть токсичным, поэтому ученые чаще используют магнетит - материал на основе железа.

Магнитные жидкости могут найти и другие медицинские применения, такие как целевая лекарственная химиотерапия. По этой технологии магнит, находящийся вне тела человека, должен направлять лекарство непосредственно в места расположения раковой опухоли, будь то опухоль легкого, простаты или мозга.

## **Магнитные курьеры**

Магнитные наночастицы, захваченные клетками рака простаты. Ядра клеток — синие, липидные мембраны — красные, наночастицы — светлые точки.

Целевая лекарственная терапия в последнее время получает все большее распространение благодаря магнитным курьерам - магнитным частицам, прикрепленным к биомолекулам, частицам лекарства, или диагностического агента. Магнитные курьеры обеспечивают два уникальных преимущества для



биологических систем. Используемые в качестве меток других молекул, они могут быть детектированы с помощью высокочувствительной магниторезистивной системы-сенсора, работающего, например, на эффекте гигантского магнитосопротивления. С другой стороны, молекулами, прикрепленными к магнитным курьерам, легко можно манипулировать с помощью внешнего магнитного поля. Это касается как процесса доведения, скажем, лекарства, до определенного органа человека, так и удержания его в этом органе.

## **Магнитоуправляемые сепараторы**

В последние десятилетия были созданы противоопухолевые препараты, способные в ряде случаев сохранить жизнь пациентам, ранее считавшимся неизлечимыми. Подавляющее большинство этих лекарств относится к группе так называемых цитотоксических агентов, то есть веществ, убивающих активно делящиеся клетки. Эти соединения, подавляя развитие злокачественного новообразования, губительно действуют и на здоровые клетки и ткани.

В первую очередь страдают активно делящиеся стволовые клетки костного мозга — их гибель приводит к нарушению естественных процессов обновления клеток. Поэтому даже процедура трансплантации клеток костного мозга оказывается бесполезной.

Спасительной для пациента стала бы очистка костного мозга, взятого у пациента, от вредоносных клеток.

В настоящее время наиболее перспективным методом решения этой задачи оказалось разделение клеток с помощью специфичной иммуносорбции на магнитоуправляемые сорбенты. Другими словами, сепарация клеток костного мозга осуществляется в магнитном поле. Что же из себя представляют магнитоуправляемые сорбенты?

Это не что иное, как соединенные вместе ферромагнитные частицы (металлические шарики диаметром не более 5 мкм, покрытые полистиролом) и антитела — искусственные образования, которые притягивают либо здоровые, либо пораженные клетки. В первом случае это положительная, во втором — отрицательная иммуносорбция. А в результате каждая из клеток, относящаяся к той или иной группе, окажется как бы в ловушке (любая из них притягивает по три-четыре антитела). И если обработанный таким образом костный мозг поместить в магнитное поле, произойдет разделение (сепарация) составляющих его клеток на "плохие" и "хорошие". Последние отделяют от первых и помещают в отдельные емкости, предварительно освобождая от магнитоуправляемых сорбентов, где и хранят до момента трансплантации.

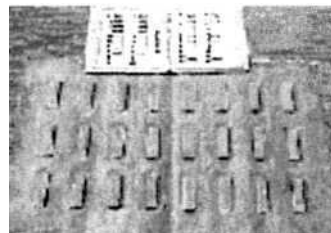
## **Магниты для извлечения игл и хранения хирургических инструментов**

Другое применение магнитных манипуляторов — извлечение инструментов в ходе операций. Все пользователи хирургических игл и игл для шприцов сталкиваются с постоянной угрозой застревания или даже потери иглы. Эта неприятность весьма часто случается во время операционных и процедурных

манипуляций. Проблема извлечения иглы при оперативном вмешательстве может быть решена с использованием специальных ручных инструментов с магнитными датчиками, которые позволяют безопасно притягивать иглы и располагать их удобным для хирурга образом и исключают тем самым необходимость пользоваться хирургическими щипцами. Другое преимущество подобного устройства заключается в том, что для извлечения сложных игл необходима всего одна манипуляция.

Игла притягивается к магнитной части инструмента, а его рукоятка имеет специальную защиту. Как только игла извлекается, она сразу же помещается в специальные боксы для утилизации с помощью очень простой плунжерной системы.

Приборы с магнитными наконечниками используются также для извлечения инородных металлических предметов из глаз, ран, и других открытых тканей человека. При этом удается максимально облегчить эту процедуру для пациента. Для хранения хирургических инструментов в послед-



нее время с успехом используется тканевый материал специальной конструкции, на котором закреплены полосы с гибкими магнитами.

### **Магнитные частицы — перспективы их использования в медицине**

В последнее время ученые-медики стали все чаще обращаться к использованию магнитных частиц для выполнения различных задач, возникающих в процессе лечения. Перспективность такой практики объясняется тем, что магнитными частицами можно управлять с помощью внешнего магнитного поля, при этом не требуется проникновение в больной орган.

### **Магнито-жидкостная гипертермия**

Медики двух берлинских больниц недавно приступили к клиническим испытаниям нового метода противораковой терапии, использующего тепло и частички железа для разрушения раковых клеток. Этот метод получил название "магнито-жидкостная гипертермия". Он предназначен, прежде всего, для терапии одной из наиболее злокачественных форм опухоли головного мозга - глиобластомы.

Метод состоит в том, что в опухолевую ткань под наркозом вводится жидкость, содержащая микроскопические частицы железа, которые поглощаются раковыми клетками. Затем опухоль подвергается воздействию внешнего магнитного поля, в результате чего наночастицы железа нагреваются до температуры 45 градусов Цельсия.

Такой нагрев разрушает опухолевую ткань и одновременно усиливает эффективность последующей лучевой терапии. Однако, лечение эффективно пока лишь на ранних стадиях заболевания. Наночастицы железа поступают в опухоль с помощью сверхчувствительной электронной навигационной систе-

мы. Это делает возможным проводить лечение глиобластомы, которая залегает глубоко в тканях мозга или располагается рядом с участками мозга, отвечающими за речь и моторные функции.

Метод магнито-жидкостной гипертермии развивается уже 12 лет и прошел успешные испытания на животных.

## **Магнитные наночастицы разрушают раковые клетки**

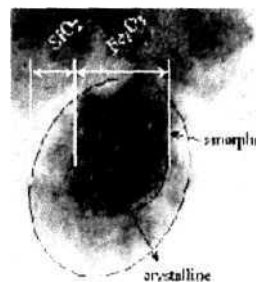
Многофункциональные наночастицы под воздействием магнитного поля могут проникать в раковые клетки, проделывая дыры в их мембранах.

Известно, что одной из основных проблем онкологии является создание эффективных маркеров, способных распознать раковые клетки среди здоровых с тем, чтобы впоследствии разрушать их, не причиняя вреда остальным. В настоящее время именно в этом качестве предлагается использовать сложные магнитные наночастицы, которые теперь могут рассматриваться как один из наноразмерных приборов для биомедицины.

Разрушительная для раковых клеток работа выполняется под действием магнитного поля. Ядро наночастиц состоит из оксидов железа. Исследователями было обнаружено, что под влиянием магнитного поля частицы, находящиеся внутри раковых клеток, способны разрывать мембраны клеток, проделывая в них дыры.

Структура наночастицы, используемой для лечения рака, наблюдаемая в электронный микроскоп высокого разрешения.

Частицы "наноклиники" состоят из нескольких элементов. Кроме магнитного ядра, которое позволяет проводить неинвазивные манипуляции, частицы содержат также красители, поглощающие инфракрасный и излучающие желтый свет, покрытие из кремния, и обособленные пептидные группы, имитирующие гормоны. Краситель позволяет "видеть" частицы с помощью ла-



зерного микроскопа, а наличие гормонов обеспечивает селективность процесса распознавания раковых и здоровых клеток.

Ядро из оксидов железа изготавливается в первую очередь и имеет средний диаметр около 18 нм. Молекулы красителя — в нем происходит процесс испускания одного желтого фотона при поглощении двух ИК-фотонов — абсорбируются на поверхности ядра. Кремниевое покрытие, добавляемое с использованием специальной технологии, увеличивает диаметр частицы еще на 7 нм. Окончательные размеры частиц составляют около 32 нм.

Исследователи проверяли действие многофункциональных наночастиц на двух линиях раковых клеток: клетках эпителиальной карциномы, клетках почечного рака зеленой африканской мартышки. Они воздействовали на раковые клетки с внедренными в них наночастицами магнитным полем в 7 Тесла, достижимым в диагностических системах, основанных на явлении магнитного резонанса. В результате было обнаружено разрушение раковых клеток на 30-

85 %. То же самое поле в отсутствие наночастиц не вызывало никакого эффекта. Исследователи пока не знают, как в точности магнитные частицы совершают свою разрушительную работу. Однако, они наблюдали, что раковые клетки, подвергшиеся описанному лечению, имеют разрывы в мембранах, в то время как здоровые клетки — нет.

По-видимому, выравнивание наночастиц в магнитном поле приводит к истиранию и повреждению мембран.

## **Магнитные частицы помогают "увидеть" опухоль**

Недавно в печати появилось сообщение о завершении важной исследовательской работы, посвященной новому методу диагностики рака. Новая техника, которая применяет магнитные частицы, обнаруживает метастазы в лимфатических узлах даже в том случае, когда они не могут быть определены другими используемыми для этих целей методами. К достоинству предлагаемой процедуры относится то, что она не требует операции.

Магнитно-резонансное изображение магнитных наночастиц отличает здоровые лимфатические узлы (зеленые) от метастатических (красные).

Для врачей, также как и для пациентов, определение расположения метастаз зачастую становится весьма обременительной процедурой. Часто единственным способом увидеть, где именно лимфатические узлы поражены раковыми клетками, является операционное вмешательство. В некоторых случаях, таких как рак желудка, такая операция может длиться несколько часов, и даже после нее хирурги не вполне уверены в том, что места расположения всех метастаз найдены правильно.



Дополнительные волнения при операционной диагностике метастатического поражения здоровой ткани вызывает тот факт, что кажущиеся чистые (здоровые) лимфатические узлы на самом деле могут быть поражены метастатическими клетками, т. е. визуальное определение локализации опухоли весьма неточно.

Крошечные магнитные частицы, являющиеся главным звеном описываемой техники, удивительно просты по составу. Если вы возьмете магнит со своего холодильника, размельчите его до состояния порошка и покроете каждую частицу сахарной оболочкой, — это и будет необходимый магнитный порошок. Тем не менее, эти простые наноагенты работают весьма эффективно. Их целями становятся не клетки опухоли, а клетки здоровой ткани, в частности, макрофаги, — класс иммунных клеток, которые перемещаются через здоровые лимфатические узлы. Будучи захвачены макрофагами, магнитные частицы изменяют магнитные свойства клетки, вызывая, в частности, уменьшение сигнала, и "затуманивание" лимфатического узла при наблюдении с помощью техники магнитно-резонансной томографии. В местах расположения метастаз опухолевые клетки заполняют лимфатические каналы, существенно

уменьшая поток микрофагов, и, тем самым, число частиц, замазывающих картинку.

Перед исследованиями пациентам ставилась внутривенная капельница, содержащая магнитные частицы в соляном растворе. Процедура МРТ, в ходе которой обследовались лимфатические узлы, проводилась спустя 24-36 часов. 75 % метастатически пораженных узлов, определенных в ходе описываемой процедуры, не могли быть определены никакими другими методами в силу малой площади поражения.

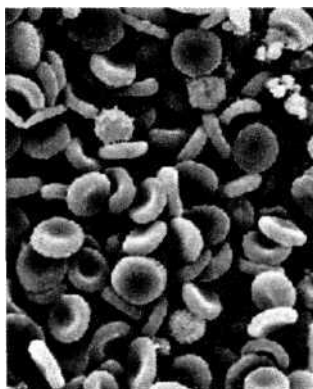
## **Магнетизм и биология: практика и перспективы Иглоотерапия**

Магнитомягкие материалы используются при изготовлении игл, которыми специалисты по иглоукалыванию лечат больных. В соответствии с представлениями восточной медицины, иглы помещаются в биологически активные точки на теле человека с тем, чтобы восстановить или выровнять энергетические потенциалы этих точек, и, тем самым, способствовать выздоровлению больного.

Известно, что магнитомягкие материалы являются концентраторами магнитного потока. Возможно, что в данном случае магнитные иглы выступают в роли проводников "биологической" энергии.

## **Красные кровяные тельца и магнитная память**

Клетки крови под микроскопом



Одним из интересных свойств крови человека и животных является тот факт, что магнитные кластеры крови с содержащимися в них атомами железа - имеют строго определенные размеры, отклонения от которых ничтожны. Это свойство магнитных частиц крови может представлять интерес для разработчиков магнитной памяти. Как известно, проблема получения сверхмалых носителей магнитной информации одинакового размера является одной из наиболее трудноразрешимых. Разработка технологии выделения магнитных кластеров крови и осаждения их последующей полимеризацией на подложку с возможностью последующего намагничивания-размагничивания могла бы совершить революцию в совершенствовании магнитной памяти.

### **8.3. Низкочастотная магнитотерапия с использованием аппаратов серии "СпОк" в клинической и восстановительной медицине**

#### **8.3.1. Механизмы биологического действия магнитных полей**

В организме существует множество субмолекулярных, молекулярных и субклеточных структур, изменения которых под действием магнитных полей могут трансформироваться в реакции клеточного, организменного и системного порядка, которые и определяют физиологическое и лечебное действие магнитотерапии (3).

Известные механизмы действия магнитных полей на живой организм достаточно подробно описаны в различных монографиях и учебниках. Позволим себе воспользоваться приведенной в учебном пособии под редакцией А.М. Беркутова и соавторов (2) и несколько видоизмененной нами схемой, подразумевающей, что организм представляет собой многоуровневую иерархическую организацию, где можно выделить следующие уровни и подуровни:

Ядерно-молекулярный.

1.1 Электронно-ядерный.

1.2 Ионно-молекулярный.

2. Цитохимический.

2.1 Субклеточные структуры.

2.2 Клеточные мембраны.

3. Тканевый.

4. Органный.

5. Системный.

6. Межсистемный.

7. Общесистемный (или организменный).

1. Ядерно-молекулярный уровень. В последние десятилетия сформировалась новая специфическая область знания — магнитобиология, интерес которой лежит на стыке различных наук — от физики до медицины. По мнению ряда авторов (4) отсутствует теория и общие физические концепции магнитобиологии, практически нет предсказательных теоретических моделей, что напрямую связано с парадоксальностью биологического действия слабых низкочастотных магнитных полей, которые по энергии далеко не сопоставимы с характерной энергией биохимических превращений. В природе не существует, кроме частиц биомagnetита в некоторых бактериях, специализированных биологических магниторецепторов, поэтому на настоящее время неизвестен механизм трансформации сигнала магнитного поля в отклик биологической системы. Первичными процессами взаимодействия магнитного поля с частицами материи, электронами, атомами, молекулами — чисто физические процессы. Заряженные частицы живого вещества, ионы и молекулы, участвующие в биофизических и биохимических процессах, скорее всего являются трансмитами в передаче сигналов магнитного поля на следующий биохимический

уровень. Тонкая регуляция активности белков ферментного типа приводит к смещению продуктов метаболизма и начиная с этого уровня можно наблюдать действие магнитного поля по изменению концентрации продуктов метаболизма. Предложено условное разделение моделей механизмов магнитобиологического эффекта на три основные группы. Феноменологические модели - сложное поведение решений уравнений химической кинетики, стохастический резонанс как усилительный механизм в магнитобиологии и другие случайные процессы, магниточувствительные фазовые переходы в биофизических системах — жидких кристаллах или упорядоченных мембранных белках, "радиотехнические" модели, в которых биологические микроструктуры и ткани изображаются в виде эквивалентных электрических цепей. Макроскопические модели - биомagnetит в магнитном поле и ферромагнитное загрязнение, Джоулево тепло и вихревые электрические токи, индуцируемые переменными магнитными полями, сверхпроводимость на уровне клеточных структур и альфа-спиральных белковых молекул, магнитогидродинамика. Микроскопические модели — движение заряженных частиц и частиц со спином в магнитном поле, в том числе эффекты резонансные, осцилляторные, интерференционные, реакции с освобождением свободных радикалов, коллективные возбуждения многочастичных систем.

Наиболее вероятными первичными физико-химическими эффектами магнитотерапии являются: ориентационная перестройка обладающих собственным магнитным моментом (спином) химически свободных молекул — радикалов, жидкокристаллических структур макромолекул, металлопротеидов (гемоглобин, каталаза, витамины) и молекул воды с наличием клатратных структур. Физические механизмы влияния магнитных полей связаны с вероятностью протекания элементарных химических реакций, когда в результате химических превращения, вследствие распаривания электронов, появляются свободно-радиальные продукты реакции с некомпенсированными спинами (5). Радикальные пары существуют в синглетном либо триплетном состояниях и переход между различными спиновыми состояниями возможен в случае воздействия внешним магнитным полем, чем изменяется вероятность течения химических реакций и, соответственно имеет место проявление тех или иных магнитобиологических эффектов, которые содержат в своей основе эти химические реакции. Так, показано влияние постоянного магнитного поля на перенос нервного импульса по седалищному нерву человека по механизму обусловленному влиянием постоянного магнитного поля на спиновые эффекты кинетики ионных каналов (6). Крайне интересными представляются работы биофизиков Армении, предложивших оригинальную теорию первичного действия магнитных полей на биологический объект. Согласно данной теории свободные ионы кальция рассматриваются как своеобразные "магниторецепторы", не наделенные, однако, компасной функцией (7, 8). В отличие от рецепторов со стационарной внутриорганной локализацией, свободные ионы кальция, согласно данной концепции, могут участвовать в порождении общего "магнитного чувства" организма через механизм трансформации внешней магнитной



энергии в нервные импульсы. Это может происходить по механизму образования аквакомплексов  $Ca^{2+}$ , при котором мгновенно снижается концентрация биоактивных ионов кальция во внеклеточной жидкости, уменьшается величина потенциала покоя (деполяризация) пресинаптических нейронов, повышается проницаемость мембран преимущественно для входа  $Na^+$ , а затем для выхода  $K^+$ , появляются импульсы (потенциалы действия) у "молчащих" нейронов. Аналогичный механизм предполагается и при участии образования крупномолекулярных аквакомплексов  $Ca^{2+}$  и соответствующем уменьшении биологически активных ионов кальция в пресинаптических окончаниях нейронных путей, ответственных за процесс научения. Выказывается также мнение о возможном механизме участия магнитного поля в инактивации кальций-зависимой протеиназы — кальпаина-1, приводящей к расстройству функций цитоскелета в регуляции поверхности нейронов через уменьшение количества специфических рецепторов постсинаптических мембран. Рассматриваются также и кальцийсвязанные эффекты магнитного поля на уменьшение объема нейронов, снижение хемочувствительности их мембран к медиаторам, угнетение функции опиоидных пептидов мозга. Изменения, происходящие в организме на электронно-ядерном и ионно-молекулярном уровнях под воздействием магнитных полей, достаточно сложно отследить и, тем более сложно интерполировать на тканевый, органный и более высокие уровни. Тем не менее, в наших исследованиях, при изучении изменений конформационного состояния гемоглобина у беременных с гестозами во втором и третьем триместрах беременности методом стационарной флуоресцентной спектроскопии и лазерной спектро-флуорометрии после применения неинвазивной гемагнитотерапии (аппарат "ГемоСпок"), выявлено перераспределение энергетически доступных конформаций гемопротеида.

2. Цитохимический уровень. Высказано мнение о первичном эффекте магнитных полей на мембрану, связанном с изменениями в водных средах организма (9, 10). Известно 8 клатратных структур воды, состоящих из метастабильных плоских пяти- или шестиугольников, состоящих из молекул воды. При воздействии магнитных полей могут происходить различные изменения этих комплексов (11). Процессы образования и распада метастабильных комплексов сопровождаются достаточно четкими эффектами, влияющими на проницаемость мембран. Так, установлено влияние переменного магнитного поля с индукцией 0,045 мТл на структуру липопротеидных комплексов мембран эритроцитов, что приводит к снижению их осмотической резистентности (12). Являясь электромагнитной системой, кровь чутко реагирует на воздействия электромагнитных полей. Уже показано, что наиболее чувствительными элементами являются мембраны эритроцитов, состоящие из фосфолипидов. Считается, что освобождение из мембран эритроцитов под воздействием хаотических неупорядоченных магнитных полей во время геомагнитных бурь фосфолипидных соединений приводит к известному в клинической медицине факту повышения риска тромботических осложнений. Высказывается мнение, что эффективной контрмерой для предупреждения и восстановления нарушенных

механизмов гемостаза во время геомагнитных бурь может стать упорядоченное, регулируемое, системное электромагнитное воздействие на организм (2). Нам представляется, что это является наиболее интересным, поскольку нами получены результаты воздействия магнитных полей на мембраны что препятствует сладжированию эритроцитов — процесса, лежащего в основе тромбообразования. Несомненно, что антиагрегантный эффект магнитотерапии связан именно с этим феноменом. Считаем необходимым отметить, что разработанная нами методика аутогемомагнитотерапии полностью соответствует пожеланиям А.М. Беркутова и соавторов, поскольку именно упорядоченное, регулируемое, системное воздействие на организм переменного магнитного поля малой интенсивности приводит к выраженному антитромботическому действию и должно войти в перечень мероприятий профилактики тромботических осложнений у пациентов группы риска, особенно в периоды с неблагоприятной геомагнитной ситуацией.

В экспериментальных условиях нами показано стимулирующее влияние гемомагнитотерапии на массу семенников крыс, содержание нуклеиновых кислот и активность сукцинатдегидрогеназной реакции в тестикулярной ткани. Показано также улучшение показателей андрогенрецепторных систем семенников и печени крыс под воздействием магнитотерапии.

3. Тканевый уровень. Влияние магнитотерапии на тканевый уровень отчетливее всего прослеживается на примере кроветворной ткани. Так, нами показан несомненный гемопоэтический эффект гемомагнитотерапии как в отношении эритропоэза, так и лимфопоэза. Эритропоэтический эффект, названный нами эритропоэтиноподобным, использован в подготовке спортсменов сборных команд Беларуси и России к прошедшей Зимней Олимпиаде. Механизмы данного эффекта остаются неясными. Возможно, объяснение лежит в выдвинутой В.В. Демьяненко гипотезе о роли в стимулирующем механизме магнитных полей антигенных структур - - продуктов автолиза, образующихся при их воздействии. На примере влияния гемомагнитотерапии на структурно-функциональные изменения гемоглобина беременных женщин, больных гестозами, нами подтверждены результаты работы С.М. Иванова, обнаружившего конформационные изменения белковых молекул и их комплексы.

4. На органном уровне выявлено существенное влияние на показатели углеводного обмена в печени, скелетных мышцах, миокарде, мозге. В экспериментальных исследованиях нами показана активизация процессов перекисного окисления липидов в крови и печени интактных крыс. У таковых же, подвергнутых гамма-облучению, магнитотерапия усиливала процессы антиоксидантной активности и снижала активность перекисного окисления липидов. Нами высказано предположение о возможном лечебном механизме местного применения магнитотерапии (аппараты "ПроСпок", "ГинеСпок", "ДермоСпок"), связанном с воздействием магнитных полей на кровь во внутриорганных сосудах, что было побудительным моментом для разработки аппарата "Гемоспок".

5. Естественно, что наибольшее количество исследований влияния магнитных полей посвящено таковым на системном уровне. Известно, что по чувствительности к магнитным полям наиболее чувствительна нервная ткань, затем эндокринные железы, органы чувств, кровь, сердечно-сосудистая, мышечная, пищеварительная, выделительная, дыхательная и костная системы. Показано, что магнитные поля могут оказывать как непосредственное влияние на структуры головного мозга, так и рефлекторное воздействие через периферическую нервную систему, результатом чего является активация адаптационных процессов, приводящая к нормализации дисфункции в деятельности систем организма. В частности происходит стимуляция процессов торможения, что лежит в основе седативного эффекта и благоприятного действия магнитотерапии на сон и эмоциональное напряжение. Наиболее выраженная реакция со стороны центральной нервной системы наблюдается в гипоталамусе, где отмечается синхронизация работы секреторных клеток, усиление синтеза и выведения нейросекрета из его ядер. Под влиянием магнитного поля с индукцией малой интенсивности снижается тонус церебральных сосудов, улучшается кровоснабжение мозга, происходит активация, как уже отмечали, азотистого и углеводно-фосфорного обменов, что повышает устойчивость мозга к гипоксии. В отношении сердечно-сосудистой системы показан вегетотонический эффект магнитных полей, снижение артериального давления. Под воздействием магнитных полей усиливается функция надпочечников, щитовидной железы, половых желез. Нами показан иммуномодулирующий эффект гемоманнитотерапии, проявляющийся в увеличении числа общих Т-лимфоцитов, Т-активных лимфоцитов, а также снижении количества В-лимфоцитов до нормы. В то же время, магнитотерапия не оказывает влияния на функциональную активность Т-лимфоцитов. Магнитотерапия вызывает гипокоагуляционный эффект за счет активации противосвертывающей системы крови, уменьшения, как уже говорили, внутрисосудистого пристеночного тромбообразования и снижения вязкости крови.

6. Влияние магнитотерапии на межсистемный уровень заключается, по нашему мнению, в информационно-энергетическом эффекте магнитного воздействия на биологические системы, что достигается за счет увеличения скоростей биохимических реакций и обменных процессов в зоне воздействия, стимуляции регенерации и повышения возбудимости нервно-мышечных процессов, улучшения микроциркуляции.

7. Описание процессов, происходящих в организме под воздействием магнитотерапии на общесистемный уровень, носит достаточно философский характер и пока, к сожалению, не выходит за рамки гипотез. Так, рассматривается трансформация под действием магнитного поля патоинформации в нормоинформацию, происходящая топически в зонах синаптической передачи сигнала, особенно в местах формирования первичного сигнала.

Далее приводим технические характеристики переменных магнитных полей, которые мы использовали при разработке гаммы аппаратов под общим

брендом "СпОк", выпускаемых совместным белорусско-российско-германским предприятием "ИнтерСпОк".

Данная аппаратура генерирует низкочастотное импульсное магнитное поле с индукцией порядка 1 мВ/см, плотность тока в ткани достигает 10 мкА/ кв.см. Используется несущая частота импульсов 10 Гц и внутриимпульсная частота 40 - - 160 Гц. Плотность потока переменного магнитного поля широко варьирует в пределах от 5 до 120 мТл.

Откуда появились данные параметры переменного магнитного поля? На начальном этапе работы нами проведены экспериментальные исследования на крысах с целью анализа действия различных параметров магнитного поля на здоровый организм и на организм в условиях системной эндотоксемии. Использовали 3 режима магнитного поля — 30.3, 50.5 и 79.7 мТл. Определяли влияние магнитного поля на ряд физиологических и биохимических параметров: измерение глубокой и поверхностной температуры тела, порога болевой чувствительности, содержание в крови железа, кальция, холестерина, общего белка, *SH*-групп, серотонина, кортикостерона, тироксина, трийодтиронина, малонового диальдегида, диеновых конъюгатов, активность супероксиддисмутазы и каталазы, степени и скорости агрегации тромбоцитов. Выявлено разнонаправленное влияние низкочастотной магнитотерапии в трех разных режимах, что привело к необходимости решения ряда технических задач при разработке магнитных индукторов для магнитотерапевтических аппаратов серии "СПОК" на совместном белорусско- российско — германском предприятии "ИНТЕРСПОК".

Принципиальное отличие серии "СПОК" от других магнитотерапевтических аппаратов состоит в том, что конструкция индукторов обеспечивает адресное воздействие *МП* на соответствующий орган.

В настоящее время фирмой "ИНТЕРСПОК" серийно выпускаются универсальные магнитотерапевтические аппараты, модификации которых будут рассмотрены в соответствующих разделах.

### **8.3.2. Клиническое применение аппаратов "СПОК"**

#### **Низкочастотные импульсные МП в ортопедии и травматологии**

##### *Остеопороз*

Ремоделирование костной ткани под воздействием низкочастотных *МП* связано с улучшением функции остеобластов и активацией проницаемости мембран, циклического аденозинмонофосфата, а также повышением парциального давления кислорода.

Воздействию магнитного поля, генерируемого установкой "ОРТОСПОК" подвергаются кисти рук и позвоночник по системе чередования через день. Мощность *МП*-- 100% (30 мТл). Продолжительность одной процедуры составляет 20 мин. Курс лечения включает 8-10 процедур, т.е. по 8-10 процедур на каждую зону.

В результате курсового лечения достоверно повышаются уровни общего и ионизированного кальция при стабильном соотношении кальций/креатинин в моче, снижается уровень дезоксипиридинолина, являющегося одним из наиболее чувствительных маркеров резорбции костной ткани.

Полученные результаты дают основание применять МТ для профилактики и коррекции остеопороза в сочетании с медикаментозными средствами по 2 - 4 курса в году.

Артроз тазобедренного, коленного, голеностопного, плечевого суставов, плечелопаточный периартрит

При проведении МТ используется индуктор для воздействия на крупные суставы, который накладывается на кожу в области пораженного сустава, первые 2 процедуры: выходная мощность составляет 80% от номинальной, время — 10 минут. С каждой последующей процедурой время увеличивается на 2 минуты (к 10-й процедуре — до 30 минут), мощность — на 10% (к 5 - 8-й процедуре -- до 120%). При этих параметрах проводят 5-7 процедур. Последние 2 процедуры проводят при мощности 90-100%. Общее количество процедур равно 7-10.

#### *Остеохондроз позвоночника*

На пораженный отдел позвоночника накладывается индуктор, предназначенный для воздействия на позвоночный столб.

При проведении первых 3-х процедур мощность составляет 80%, время — 15-20 минут, затем время процедуры постепенно увеличивают до 30 минут. Мощность в течение всего курса МТ не изменяется и составляет 80%. Общее количество процедур от 6 до 8.

#### *Болезнь Бехтерева*

МТ назначается при активности процесса не выше 2 степени. На пораженный отдел позвоночника накладывается индуктор, предназначенный для воздействия на позвоночный столб. Мощность в течение всего курса МТ не изменяется и составляет 80%. Общая продолжительность одной процедуры равна 45 минутам: по 15 минут поочередно на шейный, грудной, поясничный отделы позвоночника. При хорошей переносимости лечения допустимо увеличить мощность до 100%. Общее количество процедур — 6-7

*Комбинированное повреждение коленного сустава (крестообразная связка и мениск) в остром посттравматическом периоде*

При проведении МТ используется индуктор для воздействия на крупные суставы, который накладывается на кожу в области пораженного сустава. Мощность составляет 80% (после каждой последующей процедуры она увеличивается на 10% — до 120%); время воздействия — 10 минут. Общее количество процедур равно 8-10. Последние 2-3 процедуры необходимо проводить при мощности 80-90% в течение 20 минут.

*Магнитотерапия в послеоперационном периоде (артроскопические операции на коленном суставе), при посттравматическом отеке суставов*

При проведении *МТ* используется индуктор для воздействия на крупные суставы, который накладывается на кожу в области прооперированного сустава. 1-я процедура: выходная мощность составляет 80%, время — 10 минут. С каждой последующей процедурой время увеличивается на 2 минуты, мощность — на 10%. Максимальная мощность — 120%, время — 30 минут. Последние 2-3 процедуры необходимо проводить при мощности воздействия 80 - 90%. Общее количество процедур — 8-10. Возможно комбинировать *МТ* и электростимуляцию, которая проводится через 4 -5 часов после *МТ* (не более 5 процедур).

#### *Переломы костей*

Для проведения *МТ* используется индуктор для воздействия на крупные суставы либо суставы кистей рук (в зависимости от места перелома). После снятия иммобилизации индуктор накладывают на кожу в проекции перелома. Мощность составляет 100% (30 мТл), длительность - 25-30 минут, курс лечения — до 10 процедур. При наличии иммобилизационного остеопороза курс лечения целесообразно повторить через 4-6 недель.

#### *Магнитотерапия в комплексном лечении заболеваний предстательной железы*

Нозология заболеваний предстательной железы (ПЖ), в лечении которых широко используется аппарат "ПроСПОК" представлена, прежде всего, хроническим простатитом, нейровегетативной простатопатией, простатозом и доброкачественной гиперплазией ПЖ.

Наибольший опыт имеется в лечении хронического простатита с помощью импульсного *трансректального* воздействия. Технические характеристики создаваемого аппаратом *МП* следующие: мощность на индукторе — 3,5 Вт, напряжение на индукторе — 8 ВТ, магнитная индукция — 15 мТл, частота следования импульсов — 10 Гц, частота воздействия — 70- 90 Гц. (Почему так подробно не описан "Ортоспок"?)

Курс лечения начинается с 10-минутной процедуры с последующим увеличением времени на 2 мин ежедневно — до 20 мин. Затем время уменьшается на 2 мин ежедневно — до 10 мин. Таким образом, курс лечения составляет 8 - 12 процедур. При обострении хронического простатита можно также проводить процедуры 2 раза в день через 4-5 часов. Курс — 8-10 процедур.

Импульсное *МП*, создаваемое аппаратом "ПроСПОК" при трансректальном воздействии, способствует более быстрому купированию симптоматики и улучшению функционального состояния предстательной железы.

#### *МТ в комплексном лечении воспалительных заболеваний женских половых органов*

Терапия проводится на аппарате "ГинеСПОК" индуктором, вводимым во влагалище. Создается *МП*, ориентированное и концентрированное на матку и придатки путем передвижения магнитного индуктора для получения точной локализации воздействия. Величина индукции *МП* - 15 мТл. Время экспозиции составляет 15 мин, курс лечения — 5-6 процедур.

Улучшение общего состояния сопровождается значительной регрессией инфильтративных изменений в половых органах. Полное выздоровление в исследуемой группе (71,9%) сохранялось в течение 3-х лет. В контрольной группе это наблюдалось только у 51,6% пациенток, рецидивы заболевания и нарушение менструальной функции в течение года отмечались в 2 раза чаще, чем в основной группе.

Применение *MT* способствует достоверному увеличению относительного и абсолютного количества Т-лимфоцитов по сравнению с исходными данными, нормализации соотношения Т-хелперы/Т-супрессоры, при этом индекс супрессии достоверно возрастает и не отличается от значений у здоровых женщин. Происходит достоверное снижение содержания иммуноглобулинов *G* и *A*, *ЦИК* и угнетение классического пути активации системы комплемента а также достоверное повышение фагоцитарной активности.

*Показания для локальной MT:*

- хроническое воспаление придатков матки, эндометрит, эндоцервицит, кольпит
- хроническое воспаление придатков матки в стадии умеренно выраженного обострения
- спаечная болезнь органов малого таза
- болевой синдром в области малого таза
- альгоменорея
- гипоменструальный синдром
- трубное и эндокринное бесплодие
- в послеоперационном периоде для профилактики и лечения спаечного процесса

*Противопоказания для локальной MT:*

- наличие или подозрение на наличие злокачественного процесса в малом тазу
- острый воспалительный процесс в половых органах, сопровождающийся высокой температурой тела, ознобами
- третья и четвертая стадия чистоты влагалища

*Применение импульсного МП в лечении синдрома диабетических поражений стоп*

В лечении больных как с ИССД, так и ИНСЗ применяется импульсное низкочастотное *МП* с несущей частотой 5-15 Гц, и частотой воздействия 60-200 Гц. Величина магнитной индукции составляет 30 мТл; курс лечения - 3 процедуры по 20 мин (80% мощности) и 5 процедур по 30 мин (100% мощности). Используется индуктор в виде "сапожка" (аппарат "ДиаБСПОК").

По данным ежедневного опроса пациентов, проведенного до и после курса *MT*, отмечено уменьшение выраженности болей в конечностях, частоты судорог и парестезий; больные обращали также внимание на "потепление" конечностей, возрастание мышечной активности и силы.

По результатам (электронеурографии и ультразвуковой доплерографии) скорость проведения нервного импульса, а также кровотока на *a. dorsalis pedis* достоверно повысилась. Достоверно снизилась степень температурной и вибрационной чувствительности.

Таким образом, использование *МТ* с помощью аппарата "ДиабСПОК" является эффективным альтернативным методом физиотерапии при синдроме "диабетической стопы". Полученные результаты свидетельствуют о возможности ее использования при любой форме поражения стоп при сахарном диабете.

## **МТ в дерматологии**

Терапевтический эффект воздействия *МП* достигается за счет улучшения микроциркуляции, повышения проницаемости клеточных мембран, увеличения скорости течения биохимических реакций и обменных процессов, регенерации поврежденных тканей и др.

Для проведения процедур используется аппарат "ДермСПОК".

### *Некоторые области применения*

- атопический дерматит: воздействие проводится преимущественно на область суставных (локтевых, лучезапястных, подколенных и голеностопных) сгибов. Мощность магнитного воздействия - - 100%, время - - 15 минут, 10 процедур ежедневно.

- экзема: воздействие на 2 симметричных очага, мощность - - 100%, продолжительность— 10 минут, 10 процедур ежедневно.

- нейродермит: индуктор аппарата расположить над очагом поражения, мощность — 110%, время — 10 минут, Курс — 10 процедур ежедневно.

- бляшечная склеродермия: индуктор аппарата расположить над очагом поражения, мощность — 100%, время — 5 минут (1 и 2 процедуры), 10 минут (3 и 4 процедуры), 15 минут (5-10 процедур). Курс — 10 процедур ежедневно. Курс — 10 процедур ежедневно.

- псориаз: индуктор аппарата расположить над очагом поражения, мощность — 120%, время — 15 минут. Курс — 10 процедур через день.

*Лечение стоматологических и ЛОР заболеваний с применением локального воздействия на очаг поражения низкочастотным магнитным полем*

(Какой индуктор, с какими характеристиками?)

### Показания

- постпломбировочные боли
- воспалительные заболевания челюстно-лицевой области (периостит, остеомиелит челюстных костей, фурункул, флегмона, одонтогенные и неodontогенные синуситы) при этом в случае острых процессов воздействие производится после дренирования воспалительного очага;
- луночковые боли, альвеолит;
- травматические и инфекционные невриты II и III ветви тройничного нерва, невралгии тройничного нерва;



- парадонтоз
- синуситы
- отиты

Локальное воздействие низкочастотным магнитным полем на очаг поражения при стоматологических заболеваниях можно проводить на всех этапах лечения и практически при всех стадиях заболевания. Индуктор устанавливают в проекции очага поражения, воздействие осуществляют в течение 15 минут. Количество процедур — 7.

Однако при резко выраженном воспалительном процессе, протекающем с повышенной температурой и интоксикацией, магнитотерапию рекомендуется назначать на фоне активного медикаментозного лечения на 2-3-й день после улучшения состояния больного.

### **Магнитотерапия в косметологии**

Применение "СПОК" — терапии в этой области обусловлено характеристиками (конкретизировать) аппаратов "ДермСПОК", "ГемоСПОК", "УниСПОК", позволяющих концентрировать силовые линии *МП* на проблемных зонах, региональных лимфоузлах, гематомах и т.п. Тем самым, значительно повышается эффективность лимфодренажа тканей, улучшается микроциркуляция во всех слоях кожного покрова и пр.

Использование аппаратов "СПОК" в косметологии основано на противовоспалительном, регенерирующем, трофическом, нейромюостимулирующем, вазодилатирующем и других эффектах.

Показания для локальной *МТ*

- отеки на лице ("мешки" под глазами)
- гематомы ("синяки")

Локальное воздействие низкочастотным магнитным полем на очаг поражения осуществляют следующим образом. Индуктор устанавливают в проекции очага поражения, мощность устанавливают на 80%, воздействие осуществляют в течение 15 минут. Количество процедур — 7.

Показания для *ОМТ*

- целлюлит любой стадии
- старение кожи
- кожный зуд

Методика общей магнитотерапии: (Какой индуктор, с какими характеристиками?) мощность магнитного поля — 120%, время воздействия — 30 минут, количество процедур — 10.

### **8.3.3. Аутогемомагнитотерапия в клинической практике**

Кровь, в существенной мере благодаря эритроцитам, рассматривается как магнитонасыщенная среда т.к. ее элементы обладают собственным *МП* и вза-

и воздействие внешнего *МП* с кровью происходит, прежде всего, именно через эти структуры: свободные радикалы; гемоглобин и другие металлопротеиды; жидкокристаллические вещества смектического типа (липиды, входящие в состав мембран) и молекулы воды.

В аппарате "ГемоСПОК" генерируется импульсное низкочастотное *МП* со сложной формой импульса, напоминающего спектр электрической активности нервной ткани. Несущая частота, т.е. повторение импульсов, может колебаться от 5 до 15 Гц, а частота модуляций, т.е. изменение частоты тока внутри импульса — от 60 до 200 Гц. Аппарат позволяет получать на выходе *МП* с индукцией до 120 мТл. Продолжительность импульса и время между ними составляет 50 мс.

Действие АГМТ является антитромботическим по своей природе и, обладая выраженным реокорректирующим действием, способствует снижению вязкости крови, спонтанной агрегации эритроцитов и улучшению их деформируемости. При этом значительно угнетается адгезивная и агрегационная способность тромбоцитов, а также повышается антитромбиновая и фибринолитическая активность крови.

После проведения АГМТ развивается выраженный *иммуномодулирующий* эффект, проявляющийся изменением показателей фагоцитарной активности нейтрофилов, структурно-функциональных параметров иммунокомпетентных клеток и цитокинового статуса.

Динамика изменения концентрации "средних молекул" — рост концентрации в моче и ускорение их клиренса с мочой является косвенным показателем улучшения перфузии микроциркуляторного русла и активации органов естественной детоксикации.

АГМТ выполняется в двух вариантах: экстракорпоральная (ЭАГМТ) и чрескожная, неинвазивная (НАГМТ).

#### *Техника и методика проведения ЭАГМТ*

Курс лечения включает 4-5 процедур, выполняемых через день. Объем эксфузии составляет 2-3 мл/кг массы тела венозной крови, взятой самотеком, из вены локтевого сгиба во флакон с 50 мл физиологического раствора после внутривенного введения гепарина (2,5 — 5000 МЕ). Воздействие *МП* на кровь проводится двукратно: во время эксфузии и возврата. Нормативная величина средней мощности воздействия составляет 100%, что соответствует абсолютной величине 100 мТл (а не 120? См. выше выделенное). Среднее время воздействия составляет 30-40 мин.

Осложнения при проведении ЭАГМТ встречаются крайне редко и могут быть связаны с тромбозом кровопроводящей магистрали или развитием гематомы в месте пункции сосуда в условиях общей гепаринизации. Передозировка переменного *МП* практически невозможна, так как аппарат предусматривает автоматический контроль за временем проведения процедуры, а характеристики подаваемого *МП* во время проведения ЭАГМТ не изменяются.

При выборе места чрескожного электромагнитного воздействия (НАГМТ) предпочтение отдается кубитальной или паховой области, над которой распо-

лагается индуктор в виде диска (дать более расширенные характеристики, вплоть до материала из которого изготовлен, размеры, вес, особенности индуцируемого магнитного поля и т.д.). Пациент может оставаться в легкой одежде (сорочка, тренировочный костюм из х/б ткани). Нормативная величина средней мощности воздействия составляет 80 %, что соответствует абсолютной величине 80 мТл. (Так ли это? См выше) Длительность процедуры составляет 20 мин. Курс лечения составляет 8-10 процедур, выполняемых ежедневно.

Следует отметить, что проведение НАГМТ не требует специальных условий и соблюдения санитарно-эпидемиологических требований: проведение процедур в специальном помещении и стерильных условиях, обеспечение мер по профилактике ВИЧ-инфицирования, сывороточных гепатитов и др. Процедура может проводиться в физиотерапевтическом отделении, в палате и дома.

#### *Показания к применению АГМТ*

- Ишемическая болезнь сердца
- стабильная стенокардия напряжения всех функциональных классов
- прогрессирующая стенокардия
- подострый период инфаркта миокарда и постинфарктный кардиосклероз аритмии
- Ишемическая болезнь мозга
- транзиторные ишемические атаки
- преходящее нарушение мозгового кровообращения
- ранний и поздний период восстановительный период ишемического инсульта
- стенозирующее атеросклеротическое поражение магистральных артерий головы (при степени стеноза < 75%)
- начальные проявления недостаточности мозгового кровообращения на фоне атеросклеротического поражения
- дисциркуляторная энцефалопатия 1-2 степени
- "мягкая" артериальная гипертензия с атеросклеротическим поражением артерий
- Облитерирующие поражения артерий конечностей
- Сахарный диабет (1 и 2 типа)
- диабетическая ангиопатия
- диабетическая полинейропатия
- синдром диабетической стопы
- Вибрационная болезнь
- Ревматоидный артрит
- Гнойно-септическая патология: сепсис, панкреатит, перитонит и пр. в сочетании с иными методами детоксикации
- Хронические воспалительные заболевания легких и бронхов, ЛОР-органов, мочеполовых органов, мягких тканей

- Острые экзотоксикозы (в комплексе с методами эфферентной терапии: гемосорбция, гемодиализ)

Восстановление физической и спортивной работоспособности

*Противопоказания к АГМТ*

- острая сердечно-сосудистая недостаточность
- хроническая недостаточность кровообращения 2-3 степени
- острые инфекционные заболевания
- терминальные состояния
- активный легочный туберкулез
- острые психозы
- наличие металлических имплантатов и искусственного водителя ритма
- гипокоагуляционные состояния любой этиологии и высокий риск геморрагического синдрома (в большей степени для ЭАГМТ).

Таким образом, следует отметить, что АГМТ относится к разряду универсальных физиологических механизмов влияния на организм, носит системный, гомеостатический характер и сопровождается специфическими и неспецифическими, местными и общими изменениями со стороны различных органов и тканей.

Повышение и восстановление физической активности и выносливости с помощью низкочастотных МП

Существующие фармакологические средства и методы повышения физической и спортивной работоспособности и восстановления после физических нагрузок часто недостаточно эффективны. Кроме этого, необходим поиск достойных альтернатив допинговым средствам, получившим широкое распространение в современном спорте.

В основе показаний для использования МП в качестве средства восстановления и повышения физической работоспособности, сокращения сроков реабилитации и адаптации к физическим нагрузкам и, в том числе, к спортивным лежат современные представления о механизмах взаимодействия низкоэнергетического импульсного МП с биологическим объектом и механизмах энергообеспечения организма человека во время физических нагрузок.

Для достижения вышеназванных целей применяется система "СтимулС-ПОК", состоящая из аппарата "УниСПОК", аудиосистемы и индуктора "Мат". Система предназначена для воздействия низкочастотным МП на весь организм (общая магнитотерапия — ОМТ). (Опять же конкретизировать характеристики, позволяющие достичь требуемых особенностей).

Особенностями ОМТ, отличающими ее от локальных воздействий, являются:

- возможность низкоинтенсивных магнитотерапевтических воздействий на большие объемы тканей;
- достижение, по этой причине, необходимого терапевтического эффекта небольшими (какими ?) дозировками МП при низкой вероятности развития неспецифических эффектов;

- синхронизация функций органов и систем организма эффективных защитных и компенсаторно-приспособительных процессов без больших энергетических затрат.

При данной методике, помимо неярко выраженного прямого действия МП низкой интенсивности на все системы организма, запускаются механизмы неспецифической адаптации организма. Это приводит к формированию в организме наиболее адекватных реакций, компенсирующих нарушенные функции и оказанию на организм тренирующего воздействия с сохранением резервных возможностей

Пространственная организация действующего МП при проведении ОМТ реализована индуктором ИАМВ5 "Мат", изготовленного в виде матраца с определенным (Каким?) расположением индукторов для создания пространственно неоднородного МП. Напряженность магнитного поля на поверхности индуктора 3,1 ? 0,5 мТл.

Магнитное поле, генерируемое аппаратом, модулируется (каким образом?) музыкальной составляющей, что способствует усилению эффективности воздействия.

#### *Показания*

- необходимость релаксации
- снятие общей усталости и стресса, в том числе, у лиц, проживающих на территориях, загрязненных радионуклидами
- восстановление и повышение умственной и физической работоспособности
- восстановление биологического ритма после пересечения часовых поясов
- сезонная депрессия

Курс лечения составляет 7-8 процедур, выполняемых ежедневно. Первые 2 процедуры проводят при мощности воздействия МП 80% при длительности 15 минут. Затем следующие 3 процедуры -- 100% и 20 минут и последние 3 процедуры — 120% и 20 минут

Разработана программа сочетанного последовательного (в режиме чередования через день) воздействия на организм спортсмена гемагнитотерапии и общей магнитотерапии в условиях 21-дневного учебно-тренировочного сбора.

Гемагнитотерапия проводится по методике НАГМТ ("ГемоСПОК"). Индуктор в виде диска устанавливается над паховой областью. Длительность процедуры составляет 20 мин. Индукция МП — 80 мТл.

ОМТ осуществляется в течение 20 мин. ("СтимулСПОК"). Индукция МП составляет 5 мТл.

Результаты исследований показали, что в группе, получавшей МТ, имеется выраженная тенденция к планомерному повышению уровня *Hb* (от сбора к сбору), тогда как в контрольной группе этот уровень носит нестабильный характер.

*MT* в меньшей степени влияет на исходно высокий уровень *Hb*, однако, при этом, поддерживает достигнутый уровень *Hb* на более длительное время, несмотря на большие тренировочные нагрузки.

Приведенные данные (наряду с увеличением среднего объема эритроцитов, среднего содержания в них гемоглобина, снижения индекса их деформируемости) косвенно свидетельствуют о повышении активности и синтеза эндогенного эритропоэтина, который, среди прочего, влияет на деформируемость эритроцитов и улучшение, вследствие этого, их кислородтранспортной функции.

Стабильный уровень гемоглобина позволяет более качественно выполнять тренировочные нагрузки и, при этом, быстрее восстанавливаться.

#### *Заключение*

Подводя итог вышеизложенному, мы подчеркиваем, что применение импульсных магнитных полей низкой частоты, генерируемых аппаратами "СПОК", при удовлетворительном состоянии пациента противопоказаний, практически не имеет.

В этих условиях, применение методов немедикаментозной физико-химической терапии и, в том числе, магнитотерапии аппаратурой "СПОК", имеет не только научно-практическую, но и социальную, а также, выраженную экономическую значимость.

## **8.4. Импедансный метод контроля биофизического воздействия магнитного поля на живые ткани**

### **8.4.1. Общие положения**

Контроль биофизического воздействия магнитного поля на живые ткани важен для выбора оптимального курса магнитотерапии. К аппаратному методу, который может использоваться для такого контроля, предъявляется ряд серьезных требований.

Важнейшим требованием является неинвазивность. Любые ненужные воздействия на исследуемый орган должны быть исключены. При этом важно, чтобы измерения могли производиться непосредственно во время проведения магнитотерапевтической процедуры. Для того, чтобы предоставить клиницисту возможность контролировать отклик на магнитотерапевтическое воздействие в реальном времени необходимо, чтобы измерения могли проводиться непрерывно от начала до конца процедуры. В то же время очевидно, что процесс измерения выбранного контрольного параметра не должен интерферировать с самим магнитотерапевтическим воздействием и каким-либо образом ему мешать. Кроме того, техническая реализация выбранного метода должна отвечать конструктивным требованиям, предъявляемым к измерительному датчику. Такими требованиями являются малые размеры и легкий доступ к интересующей области. Желательно также соблюдение определенной сбалансированности материальных затрат на оснащение магнитотерапевтическо-

го прибора системой контроля, со стоимостью самого магнитотерапевтического прибора. Выбранный метод должен быть достаточно дешев и прост в реализации.

Всем вышеперечисленным требованиям удовлетворяют методы, основанные на измерении электрического импеданса живых тканей, или биоимпедансные методы. Электрический импеданс несет в себе информацию о широком спектре биофизических характеристик тканей. Показано, что изменение электрического импеданса может быть связано как со специфическими изменениями в отдельных тканях, так и во всем организме в целом.

#### **8.4.2. Применение биоимпедансных методов в медицине**

Биоимпедансные методы диагностики нашли применение в различных областях медицины. В последние годы большую популярность получило использование биоимпедансных методов для контроля за содержанием воды в организме, а также за ее перераспределением между различными отделами организма. Данная информация важна для успешного лечения широкого спектра патологий. Здесь методы, основанные на измерении удельного электрического сопротивления ткани, продемонстрировали большие преимущества перед общепринятыми инвазивными методами. Биоимпедансные методы были успешно применены для контроля за состоянием водного баланса в послеоперационный период (Gagnon, 1994), у больных с хронической почечной недостаточностью (Kong et al., 1993), у септических больных (Kreymann et al., 1995), а также у больных после аорто-коронарного шунтирования (Patel et al., 1996).

Другой важной областью применения биоимпедансных методов является диагностика злокачественных опухолей. Имеются примеры их внедрения в широкую медицинскую практику. Так, американская комиссия по продуктам питания и медикаментам (Food and Drug Administration, FDA) одобрила применение биоимпедансной системы в качестве вспомогательной методики при обнаружении рака груди (T-Scan 2000, US FDA document P970033).

Электроимпедансная спектроскопия была опробована для обнаружения и оценки степени повреждения мягких тканей после брахитерапии (Osterman et al 2004). Метод продемонстрировал свою способность к измерению степени атрофии и развития фиброза вследствие облучения. Важным результатом данной работы является то, что импедансные измерения способны обеспечить обратную связь, необходимую для подбора оптимальных параметров терапии.

\* БРАХИТЕРАПИЯ (brachytherapy) - - рентгенотерапия, при которой источник рентгеновского излучения располагают вблизи опухоли или внутри нее. Этот метод применяется для лечения многих видов опухолей (например, рака молочной железы).

### 8.4.3. Биофизические основы измерения импеданса живых тканей

В живых тканях распределение электрических полей, а также связанных с ними электрических токов зависит от электрических свойств этих тканей. К данным свойствам относятся удельная электрическая проводимость\*  $\sigma$  и диэлектрическая проницаемость\*\*  $\epsilon$ . Диэлектрическая проницаемость зависит от частоты электрического поля, в то время как удельная электрическая проводимость не меняется с частотой. Эти параметры характеризуют различные физические механизмы, которые будут изложены ниже.

Удельная проводимость - это мера подвижности ионов в жидкостях, входящих в состав исследуемой ткани, под действием электрического поля. Живые ткани являются проводниками с ионной электропроводностью. То есть электропроводность осуществляется за счет движения ионов в электролите под действием электрического поля. Электропроводность тканей зависит от содержания в них жидкости. Ткань с высоким содержанием воды и свободная от жира обладает меньшим электрическим сопротивлением, чем жировая, костная и эпителиальная. Общее количество воды, содержащейся в организме здорового человека, составляет в среднем около 60% его веса. Это количество принято разделять на внеклеточную и внутриклеточную жидкость. По данным S. Albert (1971) их процентные содержания составляют 16-20% и 38-50% от массы тела соответственно. Внеклеточная жидкость, в свою очередь, делится на плазму крови (4-5% массы тела) и на межтканевую жидкость и лимфу (13-15%).

Диэлектрическая проницаемость характеризует поляризацию вещества. Поляризация может меняться во времени под действием переменных электрических полей, что ведет к возникновению токов поляризации. Электрическая поляризация может быть определена как возмущение распределения электрических зарядов в некоторой области под действием внешнего электрического поля. Поляризация — это инерционный процесс, который не может произойти мгновенно. Постоянная времени, характеризующая длительность этого процесса, называется временем релаксации  $\tau$ . Время релаксации некоторой системы можно узнать, подав на нее ступенчатое возмущающее воздействие, и затем измерив время перехода в новое устойчивое состояние. Релаксация электронов и небольших дипольных молекул — это довольно быстрый процесс с време-

\* УДЕЛЬНАЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ПРОВОДИМОСТЬ в системе СИ измеряется в  $1/\text{Омм} = \text{См/м}$ . Образец проводника длиной  $L$ , сечением  $A$  и удельной проводимостью  $\sigma$  будет обладать сопротивлением  $R = L / (G A)$ .

\*\* ДИЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ПРОНИЦАЕМОСТЬ в системе СИ измеряется в ф/м. Плоский конденсатор с площадью обкладок  $A$ , расстоянием между обкладками  $L$  и диэлектрической проницаемостью зазора  $\epsilon$ , будет обладать емкостью  $C = \epsilon_0 \epsilon A / L$ , где  $\epsilon_0$  — диэлектрическая проницаемость вакуума.



нами релаксации, лежащими в диапазоне пико- и наносекунд, в то время как поляризация на границе раздела сред может занимать промежуток времени порядка секунд.

Рассмотрим простейшую модель, представленную на рис. 8.4.1, где исследуется образец сечением  $A$  и толщиной  $L$ , материал которого обладает диэлектрической проницаемостью  $\epsilon$  и удельной электрической проводимостью  $\sigma$ . Для данного примера закон Ома в комплексной форме будет выглядеть следующим образом:

$$\bar{I} = (\sigma + j\omega\epsilon_0\epsilon) \frac{A}{L} \bar{E}, \quad (1)$$

где  $I$  — ток, протекающий через образец,  
 $\omega$  — частота переменного тока,  
 $E$  — разность потенциалов на электродах,  
 $L$  — площадь электродов,  
 $A$  — расстояние между электродами,  
 $j = \sqrt{-1}$ .

Приведенная выше схема позволяет измерить коэффициент пропорциональности между напряжением и током, который называется полным удельным сопротивлением  $z$ .

$$z = \frac{1}{\sigma + j\omega\epsilon_0\epsilon}. \quad (2)$$

Полное удельное сопротивление состоит из двух компонент активной —  $z'$ , и реактивной —  $z''$ .

$$z = z' + jz''. \quad (3)$$

В такой цепи между напряжением и током возникнет сдвиг фаз  $\phi$ , который определяется как:

$$\phi = \arctan\left(\frac{z''}{z'}\right). \quad (4)$$

Диэлектрическая проницаемость биологических тканей зависит от частоты переменного электрического поля. Так же, как и  $z$ , диэлектрическая проницаемость может быть разложена на истинную и мнимую составляющие:

$$\epsilon = \epsilon' + j\epsilon''. \quad (5)$$

Диэлектрические свойства биологических тканей и клеток имеют ряд отличительных особенностей. Обычно диэлектрическая проницаемость имеет

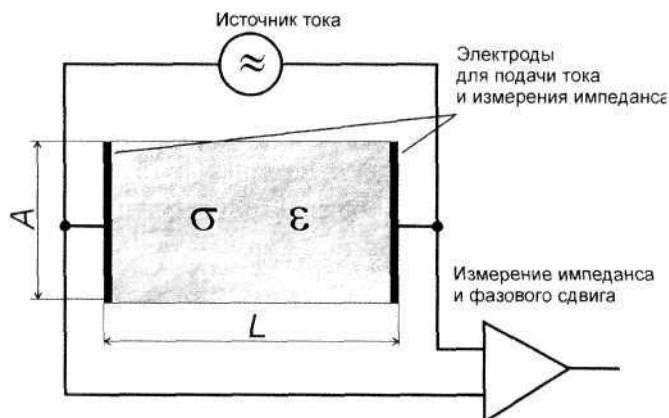


Рис.8.4.1. Измерение электрического импеданса. В исследуемый образец подается переменный ток заданной величины от источника тока через электроды, расположенные по обеим сторонам от проводящего образца. Падение напряжения на образце измеряется при помощи тех же электродов (такую схему подключения называют двухэлектродной). Напряжение и фазовый сдвиг зависят от полного сопротивления исследуемого образца.

наивысшее значение на низких частотах, а затем ступенчато снижается с увеличением частоты (рис. 8.4.2).

Такие свойства объясняются действием нескольких различных биофизических механизмов. Три колена на графике соответствуют трем основным областям релаксации, получившим названия  $\alpha$ ,  $\beta$  и  $\gamma$  области. Им соответствуют частоты со средними значениями приблизительно равными 100 Гц, 500 КГц и 25 ГГц соответственно,  $\alpha$ -область связана с внешней поляризацией мембран клеток и свойствами двойного электрического слоя.  $\beta$ -область связана с наличием у клеточной мембраны электрической емкости.  $\gamma$ -связана с релаксацией молекул воды. Далее мы рассмотрим более подробно  $\alpha$  и  $\beta$  области, так как они лежат в интересующем нас диапазоне частот (ниже одного мегагерца).

$\alpha$ -область была открыта Х. Шванном в 1957 году (Schwan, 1957). Суть явления, лежащего в основе появления  $\alpha$ -области состоит во взаимодействии так называемого двойного электрического слоя, окружающего клетку, с внешним электрическим полем. Клетки, находящиеся в электролите, благодаря наличию на своей поверхности электрического заряда притягивают противоионы и диполи воды из окружающей среды. Эти частицы, стремясь приблизиться к ионизированным группам клеточной мембраны, формируют двойной электрический слой. Если поместить клетку в однородное электрическое поле, то оно приведет к деформации двойного электрического слоя как показано на рис.8.4.3. Смещение двойного электрического слоя придает клетке свойства электрического диполя, сориентированного вдоль силовых линий внешнего

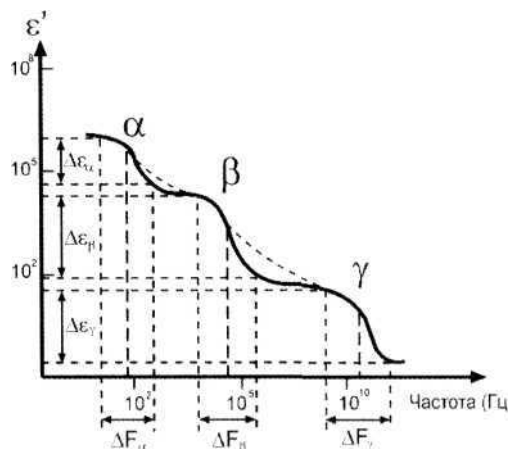


Рис. 8.4.2. Идеализированное представление зависимости диэлектрической проницаемости биологической ткани от частоты. Три основных области релаксации  $\alpha$ ,  $\beta$  и  $\gamma$  характеризуются центральными частотами  $F$  и вариациями диэлектрической проницаемости  $\Delta\epsilon$ . На практике дополнительные, менее ярко выраженные релаксационные эффекты приводят к тому, что основные области  $\Delta F_\alpha$ ,  $\Delta F_\beta$  и  $\Delta F_\gamma$  начинают пересекаться. В предельных случаях может наблюдаться зависимость, изображенная пунктирной линией (Foster and Schwan, 1989).

поля. Постоянная времени такого поляризационного процесса составляет единицы миллисекунд, что соответствует  $\alpha$ -области на частотной зависимости диэлектрической проницаемости.

Основы понимания свойств живых тканей в  $\beta$ -области были заложены в работах Х. Фрика (Fricke, 1925) и К. Коле (Cole, 1968). Ими впервые была исследована реакция клеточной мембраны на внешнее магнитное поле. Модель, описывающая поведение живой ткани в  $\beta$ -области, изображена на рис.8.4. 4. Электрические свойства данной модели характеризуются сопротивлением вне- и внутриклеточной жидкости, а также электрической емкостью мембраны. Эквивалентная электрическая схема модели изображена на рис.8.4.5. Полное сопротивление такой схемы будет равно:

$$Z = \frac{\left( \frac{1}{j\omega C_m} + R_i \right) R_e}{\frac{1}{j\omega C_m} + R_i + R_e}, \quad (6)$$

а активная и реактивная составляющие соответственно:

$$Z' = \frac{R_e + \omega^2 C_m^2 R_i R_e (R_i + R_e)}{1 - (R_i + R_e)^2 \omega^2 C_m^2}, \quad Z'' = \frac{\omega C_m R_i R_e}{1 - (R_i + R_e)^2 \omega^2 C_m^2} \quad (7)$$

Для отображения поведения полного сопротивления при различных частотах в комплексной форме часто пользуются комплексной плоскостью (рис. 8.4.6).

Импедансные измерения могут проводиться без учета фазового сдвига между напряжением и током, или, иначе говоря, в действительной области. В этом случае полезная информация об электрических свойствах ткани при различных частотах тоже может быть получена, при этом, измеряемой величи-

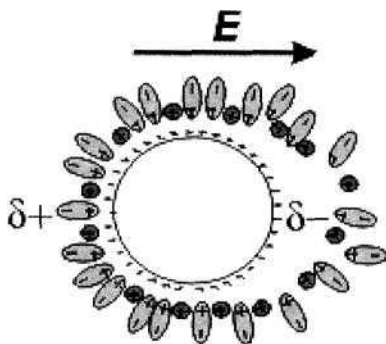


Рис. 8.4.3. Двойной электрический слой вокруг клетки образован положительными ионами, присутствующими в электролите, и молекулами воды, сориентированными своими положительными полюсами по направлению к отрицательно заряженной мембране. Под действием внешнего электрического поля двойной электрический слой смещается.

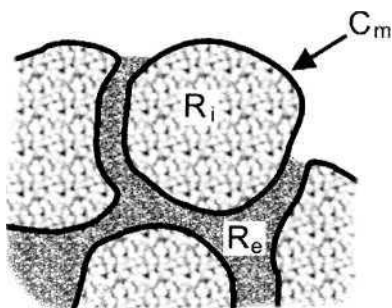


Рис. 8.4.4. Клетка и ее окружение.  $R_i$  — сопротивление внутриклеточной жидкости,  $R_e$  — сопротивление внеклеточной жидкости,  $C_m$  — электрическая емкость клеточной мембраны.

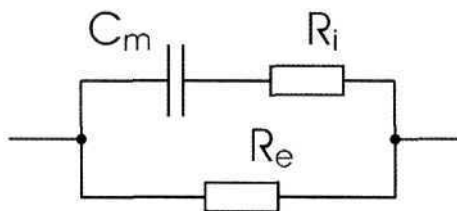


Рис. 8.4.5. Эквивалентная электрическая схема живой клетки и ее окружения.

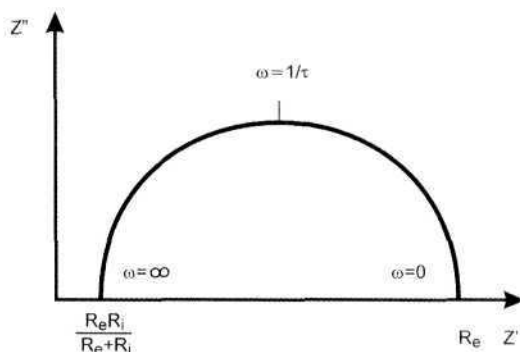


Рис. 8.4.6. Представление полного сопротивления на комплексной плоскости для схемы приведенной на рис. 5.

ной является модуль полного сопротивления  $|Z|$ . Модуль полного сопротивления связан с активной и реактивной составляющими следующим соотношением.

$$|Z| = \sqrt{Z'^2 + Z''^2}. \quad (8)$$

Зависимость модуля полного сопротивления от частоты для вышеприведенной модели выглядит следующим образом (рис.8.4.7).

Несмотря на свою простоту рассмотренная выше модель довольно полно отражает электрические свойства живой ткани в (3-области. Дальнейшее уточнение модели предполагает рассмотрение бесконечной последовательности *RC-цепочек*. При этом ткань, состоящая из одинаковых равномерно распределенных клеток сферической формы, может быть смоделирована с высокой точностью при использовании одной и той же постоянной времени для всех *RC-цепочек*. Если же форма клеток отлична от сферической, а размеры и форма клеток варьируется, то возникает множество постоянных времени. Решение этой проблемы было предложено Коле и Коле в 1941 году (Cole and Cole, 1941). Ими было выведено следующее эмпирическое выражение для полного сопротивления:

$$Z = R_{\infty} + \frac{R_0 - R_{\infty}}{1 - (j\omega\tau)^{\rho}}, \quad (9)$$

где  $R_{inf}$  — сопротивление ткани при частоте, стремящейся к бесконечности,  
 $R_0$  — сопротивление ткани на постоянном токе (при частоте, стремящейся к нулю),

$\tau$  — постоянная времени, являющаяся усредненным временем релаксации по множеству возможных постоянных времени,

$\rho$  — характеризует ширину распределения постоянных времени.

Представление полного сопротивления данной модели на комплексной плоскости получило название диаграмма Коле (рис.8.4.8). Из-за своей простоты данная модель широко используется для анализа результатов биоимпедансных измерений.

Из изложенного выше следует, что на низких частотах (порядка сотен герц) ток в живой ткани протекает в основном в межклеточном пространстве, а также по сосудам и межтканевым щелям. Путь протекания тока в ткани определяется составом ткани, или отношением внеклеточного объема к внутриклеточному. Таким образом, удельная проводимость зависит от типа ткани, а важными факторами, влияющими на электрический импеданс, являются размер и форма клеток.

На более высоких частотах ( $\beta$ -область и выше) ток может протекать и во внутриклеточном пространстве. Частота, на которой происходит переход от межклеточного протекания тока к внутриклеточному, зависит от размера мембранных структур. В более крупных структурах этот переход происходит при меньших частотах, чем в мелких структурах. Кроме того, импеданс на высоких частотах зависит от состава мембран, степени развития цитоскелета, а также

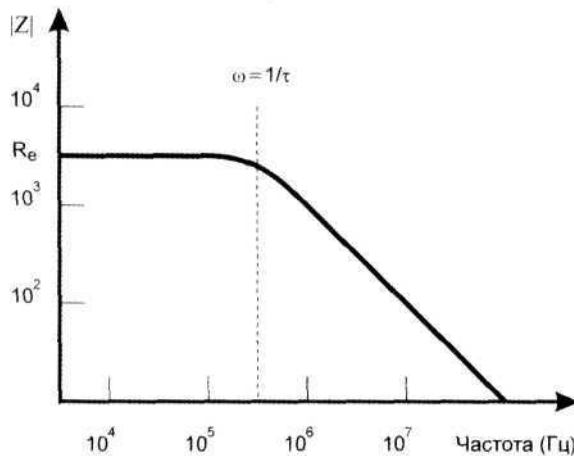


Рис. 8.4.7. Зависимость модуля полного сопротивления от частоты для схемы, приведенной на рис. 5.

электрических свойств субклеточных структур (мелких структур связанных с мембраной, таких, например, как митохондрия).

То, насколько сильно сопротивление ткани уменьшится с увеличением частоты, зависит от объемной доли клеток, присутствующих в ткани. Примером могут служить работы по исследованию ткани в процессе зарубцовывания (Chang, 1998). Известно, что коллаген\*, являющийся основным компонентом при образовании фиброза\*\* имеет высокую проводимость и не содержит мембранных структур. В этой связи, замещение здоровых клеток со всеми их сложными мембранными структурами на фиброзный шрам приводит к увеличению проводимости (в особенности на низких частотах) и уменьшению емкостной составляющей полного сопротивления ткани (также являющейся следствием потери клеточных мембран).

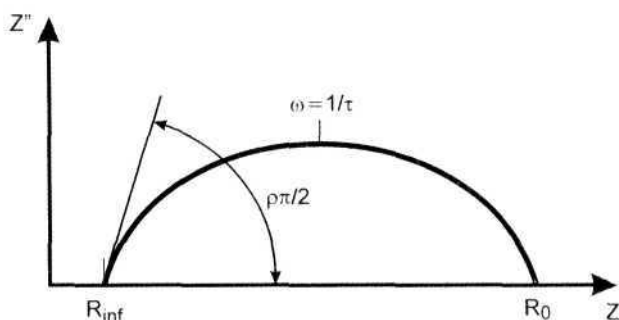


Рис. 8.4.8. Диаграмма Коле.

Результаты импедансных измерений чувствительны к температуре окружающего воздуха. В работе М. Вуопо и его коллег (Vuono et al., 2004) было показано, что при увеличении температуры с 15 до 35 происходило значительное снижение биоимпеданса. Это явление объясняется увеличением кожного кровотока (в том числе и в зоне измерений), и, как следствие, увеличением

**КОЛЛАГЕН** (collagen) — белок, образующий главные фибриллярные структуры межклеточного вещества соединительной ткани - коллагеновые волокна. Некоторые соединительнотканые структуры (например, связки, фасции, пластины, апоневрозы, сухожилия) сформированы, в основном, параллельно расположенными коллагеновыми волокнами, образующими пучки. Коллаген также присутствует в коже, костях, хрящах и связках. Он является относительно неэластичным, однако способен хорошо растягиваться.

\*\* **ФИБРОЗ** (fibrosis) — утолщение и появление рубцовых изменений в соединительной ткани, часто возникающее в результате ее воспаления или травмы.

объема проводящего электролита, каковым является плазма крови. Следствием, вытекающим из данного наблюдения, является необходимость проведения биоимпедансных измерений при постоянной температуре для избежания температурных артефактов.

#### **8.4.4. Технические особенности измерения биоимпеданса**

Измерение импеданса производится с помощью электродов, располагаемых на коже пациента в непосредственной близости от исследуемой области. Через электроды пропускается слабый переменный ток ( $10^{-5}$  -  $10^{-4}$  А), и измеряется разность потенциалов на электродах, вызванная протеканием тока.

Различают несколько разновидностей биоимпедансных методов. Если требуется измерить пространственное распределение электрической проводимости в заданной области, то такой метод принято называть импедансной томографией. В случае, если измеряется зависимость проводимости от частоты, такой метод обычно называют импедансной спектроскопией. Частоты могут варьироваться от единиц герц до десятков гигагерц. Измерения на постоянном токе (или на частоте 0 герц) сильно затруднены из-за того, что при контакте электрода с кожей всегда возникают электрохимические потенциалы, искажающие импедансные измерения.

В измерительных схемах число и конфигурация электродов может варьироваться. Среди стандартных конфигураций различают 2-х и 4-х электродные схемы измерения биоимпеданса. В двухэлектродной схеме одна и та же пара электродов служит и для подачи тока в исследуемую ткань, и для измерения разности потенциалов, как показано на рисунке 1. В четырехэлектродной схеме для выполнения каждой из вышеназванных функций имеется своя пара электродов (рис 8.4.9). 4-х электродные импедансные измерения обладают преимуществом перед двухэлектродными. Такая схема менее чувствительна к изменению сопротивления контакта с кожей, что снижает разброс измеряемых величин между повторными измерениями и различными пациентами.

При установке электродов рекомендуется удалять волосяной покров и тщательно очищать поверхность кожи. Эти меры могут снизить сопротивление контакта электрода с кожей до 100 раз. Кроме того, рекомендуется применять специальные контактные гели, которые улучшают электрический контакт. Применение гелей позволяет уменьшить градиент ионной концентрации между кожей и электродом, что снижает дрейф импеданса во время измерений.

Существующие серийно выпускаемые приборы для измерения биоимпеданса (такие как Solartron 1260, Solartron Analytical и Vital Signs model 70175 impedance analyzer, Country Tech, WI) обладают высокой степенью универсальности. Они могут работать в широком диапазоне измеряемых сопротивлений (0.1 Ом - - 10 Мом) и частот (0-10 МГц), и способны измерять активную и реактивную составляющие, а также фазовый сдвиг с высокой точностью. К недостаткам промышленных установок можно отнести их стационарность (а следовательно большие размеры и массу) и высокую стоимость.



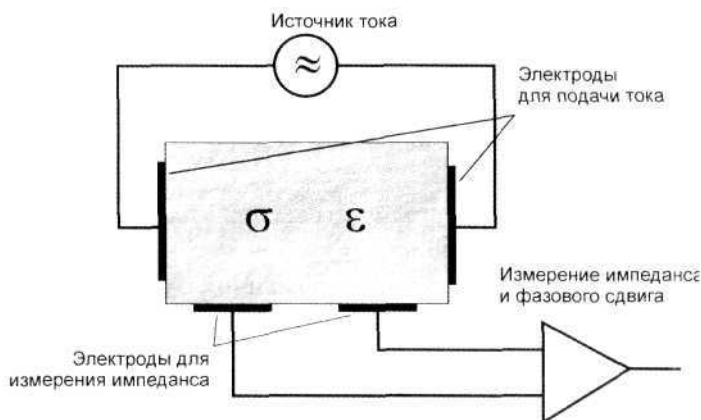


Рис. 8.4.9. Измерение импеданса по четырехэлектродной схеме. Применение отдельных пар электродов для подачи тока и для измерения импеданса уменьшает негативное влияние контакта с кожей.

## 8.5. Применение магнитно-резонансной томографии

Магнитно-резонансная томография (МРТ) за последние годы стала одним из ведущих методов неинвазивной диагностики. С 70-х годов, когда принципы магнитного резонанса впервые стали использоваться для исследования человеческого тела, до сегодняшних дней этот метод медицинской визуализации неузнаваемо изменялся и продолжает быстро развиваться. Совершенствуются техническое оснащение, программное обеспечение, развиваются методики получения изображений, разрабатываются парамагнитные и ферромагнитные контрастные препараты.

Это позволяет постоянно находить новые сферы применения МРТ. Если сначала ее применение ограничивалось лишь исследованиями центральной нервной системы, то сейчас МРТ с успехом применяется практически во всех областях медицины.

История развития МРТ непродолжительна, однако цепь находок в течение лишь 50 лет привела к одному из самых выдающихся медицинских открытий XX века, сравнимому лишь с идеей Конрада Рентгена применять в медицине X-лучи. В 1946 г. ученые из США Феликс Блох и Ричард Пурселл независимо друг от друга открыли явление ядерного магнитного резонанса (ЯМР) для жидкостей и твердых тел. В 1952 г. они оба были удостоены Нобелевской премии по физике, а ЯМР начал использоваться в физической и органической химии, физике твердых тел, биофизике и биохимии. В 1972 г. проф. Пол Лаутербур получил первое в мире двухмерное ЯМР-изображение двух стеклянных капилляров, заполненных жидкостью. Правда, на получение этого изображения ушло 4 ч 45 мин. Всего 8 лет потребовалось для появления в клинике первых МР-томографов для исследования всего тела (1980-1981 гг.). После включения ЯМР в число методов медицинской томографии прилага-

тельное "ядерный" было опущено из соображений маркетинга и по настоянию специалистов по радиологии из-за того, что оно в массовом сознании связано с ядерным оружием или ядерными электростанциями, с которыми ЯМР не имеет ничего общего. Поэтому в наши дни используется уже термин "магнитно-резонансная томография".

Парк МР-томографов рос достаточно быстро — если в 1983 г. во всем мире было всего лишь несколько приборов, пригодных для клинических исследований, то к началу 1996 г. в мире работало примерно 10 000 томографов. В СССР первый МР-томограф был установлен в 1984 г. в отделе томографии Кардиологического научного центра АМН. Там же в 1994 г. был установлен и первый сверхпроводящий томограф с высоким полем. Ежегодно вводится в практику около 1000 новых приборов. По прогнозам аналитиков, к концу века в США, Японии, странах Европы один МР-томограф будет приходиться на каждые 100 000 населения. Количество МР-томографов в России пока невелико — менее 100, в первую очередь это связано с тем, что МР-томографы являются одним из самых дорогостоящих видов медицинской техники (цена его превышает стоимость рентгеновского компьютерного томографа в среднем в 2-3 раза). Однако если до 1991 г. весь парк МР-томографов в нашей стране был представлен относительно недорогими моделями с резистивными магнитами, то с 1991 г. в России появились аппараты со сверхпроводящими магнитами. Имеются и отечественные модели МР-томографов ("Образ 1-3").

Кратко о сущности метода: магнитный резонанс это физическое явление, основанное на свойствах некоторых атомных ядер при помещении их в магнитное поле поглощать энергию в радиочастотном (РЧ) диапазоне и излучать ее после прекращения воздействия РЧ-импульса. При этом напряженность постоянного магнитного поля и частота радиочастотного магнитного поля должны строго соответствовать друг другу, что и называется ядерным магнитным резонансом: ядерным — поскольку взаимодействие происходит только с магнитными моментами атомных ядер, магнитным -- так как эти моменты ориентированы постоянным магнитным полем, а изменение их ориентации вызывается радиочастотным магнитным полем, резонансом - - поскольку параметры этих полей строго связаны между собой. Наиболее интересными для медицины являются ядра  $^1H$ ,  $^{13}C$ ,  $^{23}Na$ ,  $^{31}P$ , так как все они присутствуют в теле человека. Характер интенсивности сигнала в МРТ определяется, в основном, 4 параметрами: протонной плотностью (количеством протонов в исследуемой ткани), временем спин-решетчатой релаксации ( $T_1$ ), временем спинспиновой релаксации ( $T_2$ ), движением или диффузией исследуемых структур. Для МРТ разработаны различные импульсные последовательности, которые, в зависимости от цели, определяют вклад того или иного параметра в интенсивность изображения исследуемых структур для получения оптимального контраста между нормальными и измененными тканями.

Для создания магнитного резонанса необходимо постоянное, стабильное и однородное магнитное поле.

В зависимости от напряженности магнитного поля все МР-томографы обычно классифицируются на сверхнизкие (менее 0,1 Тл), низкочастотные (0,1 — 0,4 Тл), среднечастотные (0,5 Тл), высокочастотные (1-2 Тл), сверхвысокочастотные (выше 2 Тл). Приборы с полем до 0,3 Тл обычно имеют резистивные или перманентные магниты, выше 0,3 Тл — сверхпроводящие. В клинической практике верхний предел напряженности магнитного поля составляет 2-2,5 Тл, это предел безопасности магнитного поля для человеческого организма. Выше этого предела поля предполагаются потенциально опасными и могут допускаться для использования только в исследовательских лабораториях. Вопрос об оптимальной напряженности магнитного поля — постоянный предмет дискуссий среди специалистов. Более 90% парка МР-томографов составляют модели со сверхпроводящими магнитами (0,5 — 1,5 Тл). Интересно отметить, что если в середине 80-х годов фирмы-производители МР-томографов руководствовались принципом "чем выше поле, тем лучше", делая упор на модели с полем 1,5 Тл и выше, то уже к концу 80-х стало ясно, что в большинстве областей применения они не имеют существенных преимуществ перед моделями со средней силой поля. Поэтому основные производители МР-томографов ("Дженерал Электрик", "Сименс", "Филипс", "Тошиба", "Пикер", "Брукер" и другие) в настоящее время основное внимание уделяют выпуску моделей со средним и даже низким полем, которые отличаются от высокочастотных систем компактностью и экономичностью при удовлетворительном качестве изображений и существенно меньшей стоимости. Высокочастотные системы используются преимущественно в научно-исследовательских центрах для проведения МР-спектроскопии.

Хотя по своим физическим принципам МРТ не имеет ничего общего с рентгенологическими методами исследований, при ее развитии и внедрении в клиническую практику был использован опыт рентгеновской компьютерной томографии (КТ). Поскольку к моменту появления МРТ КТ уже прочно заняла свое место среди других методов диагностики, то внедрение МРТ (как из диагностических, так и финансовых соображений) во многом определяется тем, насколько она эффективна при той или иной патологии по сравнению с КТ или ультразвуковыми методами исследования (УЗИ).

Достоинства и недостатки МРТ (по сравнению с КТ) обуславливают целесообразность ее применения при диагностике заболеваний различных органов и систем человеческого организма. К основным достоинствам МРТ относятся неинвазивность, безвредность (отсутствие лучевой нагрузки), трехмерный характер получения изображений, естественный контраст от движущейся крови, отсутствие артефактов от костных тканей, высокая дифференциация мягких тканей, возможность выполнения МР-спектроскопии для прижизненного изучения метаболизма тканей *in vivo*.

К основным недостаткам обычно относят достаточно большое время, необходимое для получения изображений (как минимум, несколько секунд, обычно минуты), что приводит к появлению артефактов от дыхательных движений (что особенно снижает эффективность исследования легких), нарушение

ний ритма (при исследовании сердца), невозможность надежного выявления камней, кальцификатов, некоторых видов патологии костных структур, достаточно высокая стоимость оборудования и его эксплуатации, специальные требования к помещениям, в которых находятся приборы (экранирование от помех), невозможность обследования больных с клаустрофобией, искусственными водителями ритма, крупными металлическими имплантатами из неметаллических металлов.

Остановимся отдельно на противопоказаниях к МРТ-исследованию (см. таблицу) [6]. К абсолютным относят состояния пациентов, при которых проведение исследования создает угрожающую для их жизни ситуацию. Например, наличие имплантатов, которые активируются электронным, магнитным или механическими путями, — это в первую очередь искусственные водители ритма. Воздействие радиочастотного излучения МР-томографа может нарушить функционирование стимулятора, работающего в системе запроса, так как изменения магнитных полей могут имитировать сердечную деятельность. Магнитное притяжение может вызвать также смещение стимулятора в гнезде и сдвинуть электроды. Кроме того, магнитное поле создает препятствия для работы ферромагнитных или электронных имплантатов среднего уха. Наличие искусственных клапанов сердца представляет опасность и является абсолютным противопоказанием только при исследовании на МР-томографах с высокими полями, а также если клинически предполагается повреждение клапана. К абсолютным противопоказаниям к исследованию относится также наличие небольших металлических хирургических имплантатов (гемостатические клипсы) в центральной нервной системе, так как смещение их вследствие магнитного притяжения угрожает кровотечением. Их наличие в других частях тела имеет меньшую угрозу, так как после лечения фиброз и инкапсулирование зажимов помогают удерживать его в стабильном состоянии. Однако, помимо потенциальной опасности, наличие металлических имплантатов с магнитными свойствами в любом случае вызывают артефакты, создающие сложности для интерпретации результатов исследования.

К относительным противопоказаниям, помимо перечисленных выше, относятся также некомпенсированная сердечная недостаточность, необходимость физиологического мониторинга (механическая вентиляция легких, электрические инфузионные насосы).

Клаустрофобия является препятствием для проведения исследования в 1-4% случаев. Преодолеть его можно, с одной стороны, использованием приборов с открытыми магнитами, с другой — подробным объяснением устройства аппаратуры и хода обследования.

Что касается обследования беременных женщин, свидетельств повреждающего действия МРТ на эмбрион или плод не получено, однако рекомендовано избегать МРТ в первые 3 мес беременности. Применение МРТ при беременности показано в случаях, когда другие неионизирующие методы диагностической визуализации не дают удовлетворительной информации. МР-томографическое обследование требует большего участия в нем больного, чем КТ, так

как движения больного во время исследования значительно сильнее влияют на качество изображений, поэтому исследование больных с острой патологией, нарушенным сознанием, спастическими состояниями, деменцией и детей нередко бывает затруднительным.

Таблица.

**Относительные и абсолютные противопоказания к проведению МРТ**

| Противопоказания                                       |                                                                                                                                                                        |
|--------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| абсолютные                                             | относительные                                                                                                                                                          |
| Кардиостимуляторы                                      | Прочие стимуляторы (инсулиновые насосы, нервные стимуляторы)                                                                                                           |
| Ферромагнитные или электронные имплантаты среднего уха | Неферромагнитные имплантаты внутреннего уха, протезы клапанов сердца (в высоких полях, при подозрении на дисфункцию)                                                   |
| Кровоостанавливающие клипсы сосудов головного мозга    | Кровоостанавливающие клипсы прочей локализации, декомпенсированная сердечная недостаточность, беременность, клаустрофобия, необходимость в физиологическом мониторинге |

НИИ кардиологии им. А. Л. Мясникова КНЦ РАМН обладает опытом применения МРТ (с 1984 г.) и является пионером использования этого метода в нашей стране. За это время были накоплены и обобщены большие научные и практические знания, позволяющие с достаточной определенностью высказаться как об оптимальной конфигурации и технических характеристиках МР-томографов (в зависимости от предполагаемой области их использования), так и о показаниях к применению и диагностической эффективности МРТ по сравнению с другими методами.

Проводились специальные сопоставления результатов МРТ с данными УЗИ и КТ для определения целесообразности применения метода при различных видах патологии. Суммируя результаты наших исследований, а также опираясь на опыт зарубежных специалистов, можно следующим образом классифицировать области использования МРТ.

При заболеваниях головного мозга первоначально предпочтение должно отдаваться КГ как более экономичному и быстрому методу (время исследования пациента при К.Т обычно в 2-2,5 раза меньше, чем при МРТ). МРТ применяется для уточнения результатов КГ, если в этом есть необходимость.

Однако если имеются подозрения на наличие поражения мозга в области задней черепной ямки, ствола, мелкоочаговых или диффузных поражений белого вещества (например, рассеянный склероз, энцефалиты, лакунарные инфаркты), необходима неинвазивная оценка состояния интракраниальных артерий (аневризмы, артериовенозные мальформации), то целесообразно начинать обследование сразу с МРТ. Парамагнитные контрастные средства позволяют более эффективно выявлять патологию центральной нервной системы (рис. 8.5.1 ).



Рис. 8.5.1. МР-изображение абсцесса головного мозга до (слева) и после (справа) контрастного усиления "Омнисканом". Сагиттальная плоскость, T1-взвешенное изображение.

Видно отчетливое контрастирование капсулы абсцесса.

При исследованиях спинного мозга и межпозвонковых дисков в шейном и грудном отделах МРТ предпочтительнее КГ, так как она позволяет получать сагиттальные срезы, не дает артефакты от костных структур и не требует введения контрастных средств (рис. 8.5.2). В то же время при целом ряде патологических процессов КТ остается важным и необходимым методом исследования.

МРТ (особенно системы со сверхпроводящими магнитами) имеет ряд преимуществ перед КТ 3-го и 4-го поколений при исследовании сердца и магистральных сосудов. Появление МР-ангиографии и динамических программ (кино-МР) еще более расширили возможности МРТ в диагностике сердечно-сосудистой патологии. Сегодня с помощью МРТ возможна достоверная оценка не только анатомии, но и функции сердца, внутрисердечной гемодинамики, перфузии миокарда (рис. 8.5.3).

Визуализация органов малого таза у мужчин и женщин - еще одна область, где МРТ, как правило, имеет преимущества перед КТ. На МР-изображениях хорошо видны зональная анатомия матки, предстательной железы, инвазия опухолей в жировую клетчатку и мышцы, лимфатические узлы.

При исследовании печени, селезенки, почек и надпочечников, выявлении опухолей средостения и шеи диагностические возможности МРТ примерно



Рис. 8.5.2. МР-изображение задней центральной грыжи диска *L4-L5* (стрелка), T2-взвешенное изображение, сагиттальная плоскость



Рис. 8.5.3. Кино-МРТ сердца. Виден поток митральной регургитации (стрелка)

сопоставимы с таковыми КТ, поэтому по упомянутым выше причинам предпочтение как методу выбора отдается КТ. Существуют отдельные ситуации, когда МРТ может дать больше информации, чем КТ, — например, при выявлении мелких гемангиом (рис. 8.5.4), оценке степени инвазии сосудистых структур брюшной полости, диагностике внепочечниковых феохромоцитом.

Несомненны достоинства МРТ при исследованиях суставов. На МР-изображениях очень хорошо видны хрящевые поверхности суставов, мениски, связочный аппарат (рис. 8.5.5). Метод позволяет выявлять метастатические поражения костей, остеомиелит, аваскулярные некрозы еще на той стадии, когда они затрагивают лишь костный мозг и не вызывают деструкции костных структур, видимой на рентгеновских изображениях.

И, наконец, как показали сравнительные исследования, применение МРТ практически не имеет смысла при легочной патологии, заболеваниях желчного

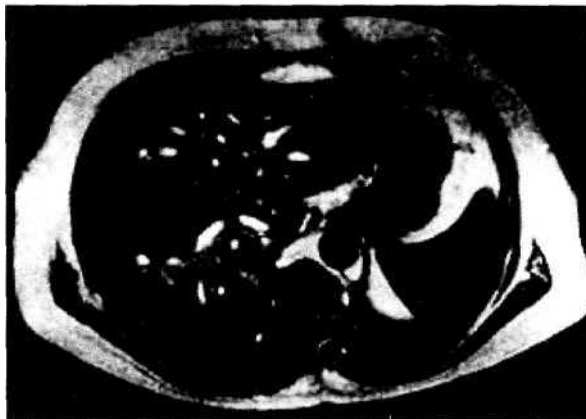


Рис. 8.5.4. Гемангиома печени (стрелка). T1-взвешенное МР-изображение в поперечной плоскости



Рис. 8.5.5. МРТ при разрыве мениска коленного сустава. Разрыв виден как светлая полоса на фоне низкоинтенсивного мениска (стрелка). T1-взвешенное изображение, сагиттальный срез

пузыря, в выявлении камней, кальцификатов, переломов костей. МРТ не применяется для диагностики заболеваний желудка и кишечника.

Следует отметить, что развитие МРТ продолжается.

Появляются новые методики исследования, вводятся в практику МР-контрастные препараты. Особенно интересной представляется разработка органоспецифических агентов, т. е. веществ, специфических для определенного типа нормальных или патологических тканей.

Наиболее интенсивные работы ведутся по совершенствованию методик МР-ангиографии, кино-МРТ, подавлению артефактов от дыхания, МР-спектроскопии, трехмерному сбору и реконструкции изображений.



Можно смело сказать, что МРТ из экзотического метода исследования с неясными показаниями к применению (начало 80-х годов) превратилась в целую область медицинской диагностики, дополняющую традиционные методы радиологии, повышающую информативность радиологического обследования в целом.

## **Аппаратура для МР-томографии**

### **Назначение и преимущества МР-томографии**

В начале 70-х годов P.Lauterbur и R.Damadian продемонстрировали принципиальную возможность получения изображений внутренней структуры биологических объектов с использованием ядерного магнитного резонанса. Менее чем за 20 лет магнитно-резонансная томография прошла путь от первых лабораторных экспериментов до широкого внедрения в медицинскую практику. Уже в начале 80-х годов появились первые промышленные МР системы. Сегодня только в США насчитывается более 3000 томографов, а крупнейшие фирмы производители, такие как "General Electric" (США), "Siemens" (Германия), "Philips" (Голландия), ежегодно продают от 200 до 400 МР систем каждая.

Широкому внедрению в медицинскую диагностическую практику МР-томографов способствуют уникальные возможности, превосходящие возможности любых других видов томографии (рентгеновской, ультразвуковой, позитронно-эмиссионной):

Возможность получения изображений с любой ориентацией плоскости сканирования, а также непосредственно трехмерных (не реконструированных) изображений, без каких-либо механических перемещений оборудования или пациента;

Наличие целого ряда параметров (времена релаксации  $T_1$  и  $T_2$ , химический сдвиг частоты прецессии), обусловленных самим явлением ядерного магнитного резонанса и позволяющих контрастировать отображения распределения плотности ядер (обычно протонов), что существенно расширяет диагностическую информативность получаемых изображений. Благодаря этому магнитно-резонансная томография используется при обследовании практически всех органов пациента, процессов обмена веществ, а спектр диагностируемых заболеваний, причем на ранней стадии их развития, постоянно расширяется;

Возможность спектроскопии на различных типах ядер (фосфор, углерод, натрий), естественно присутствующих в теле пациента;

Безвредность обследования, подтвержденная широкой клинической практикой.

*Состав аппаратуры и классификация томографов.*

Основными элементами МР-томографа являются:

Магнит с однородным и стабильным полем. Диапазон полей используемых в медицинской практике составляет от 0.02Т до 3Т.

Импульсные градиентные обмотки, создающие пространственную вариацию поля и частоты прецессии.

Источники питания магнитов и импульсных градиентных обмоток.

Система высокочастотного возбуждения и приема ЯМР сигнала. Диапазон частот определяется типом ядер, на которых происходит работа и величиной основного поля, и лежит в пределах от единиц до сотен мегагерц.

Компьютерная система управления процессом сканирования, сбором и обработкой данных, визуализацией и постобработкой изображений.

Классифицируются МР-томографы по уровню основного поля и типу используемого магнита:

Томографы с ультранизким полем: 0.02Т-0.01Т. Используются резистивные (электромагниты) и постоянные магниты. Стоимость от 200 тыс.\$ до 350 тыс.\$.

Томографы с низким полем: 0.1Т-0.3Т. Используются резистивные и постоянные магниты. Стоимость от 350 тыс.\$ до 900 тыс.\$.

Томографы со средним полем: 0.3Т- 0.6Т. Используются сверхпроводящие магниты. Стоимость от 1000 тыс.\$ до 1600 тыс.\$.

Томографы с сильным полем: 0.6Т-3Т. Используются сверхпроводящие магниты. Стоимость от 1800 тыс.\$ до 2500 тыс.\$.

Резистивные магниты были исторически первыми применены в клинических установках. Они проще в изготовлении, дешевле сверхпроводящих или магнитов на основе редкоземельных постоянных магнитов. Однако они требуют мощного (до 100кВт) и стабильного источника питания, системы водоохлаждения с качественной очисткой воды. Уровень поля в них ограничен величиной 0.3Т, при котором отношение сигнал/шум еще не достаточно высоко и по качеству и времени сканирования они уступают томографам с более сильными полями.

Постоянные магниты работают в том же диапазоне полей. Магниты на основе ферритов сравнимы по стоимости с резистивными, но обладают большим весом.

Магниты на основе редкоземельных материалов существенно превосходят по стоимости резистивные. Постоянные магниты не требуют источника питания, но нуждаются в системе стабилизации температуры помещения и магнита из-за плохой температурной стабильности материала магнитов.

Сверхпроводящие магниты используются в диапазоне средних и высоких полей. Они являются наиболее дорогими, но и обеспечивают наилучшее качество изображения благодаря высокому уровню поля и высокой стабильности (магнит работает в режиме "замороженного потока" без внешнего источника питания).

Не случайно наибольший прогресс в совершенствовании магнитных систем томографов наблюдается именно в области сверхпроводящих магнитов. Сегодня они покрывают более 80% рынка МР-томографов. Отсутствие электропотребления (питание необходимо только при заведении тока, что делается 1 раз в несколько лет), низкий вес (современные магниты весят менее 4т), малый расход хладагента (магниты со встроенными рефрижераторами

требуют подлива 200-300 литров жидкого гелия 1-2 раза в год) делают их максимально привлекательными для потребителя.

### *МР томографы в России.*

В настоящее время в России установлено несколько сотен томографов, в основном зарубежного производства.

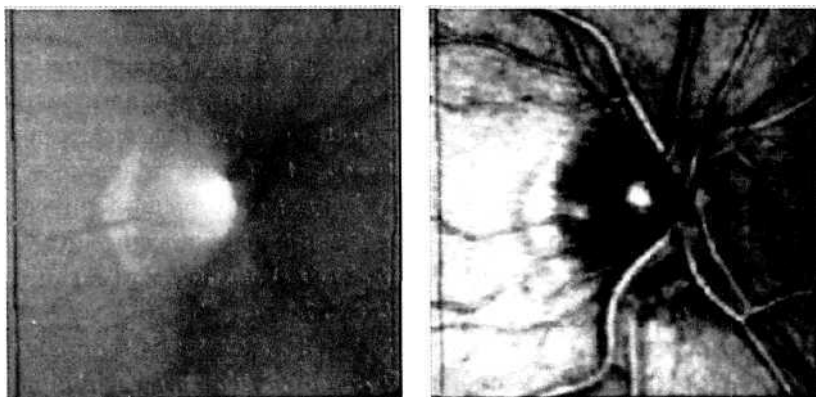
Отечественными производителями МР-томографов является НПФ "АЗ" (резистивные и постоянные томографы с полем 0.15Тл) и НИИЭФА им. Д.В.Ефремова (сверхпроводящий томограф с полем 0.5Тл).

## **Перспективные технологии магнитно-резонансной томографии**

Наиболее важными направлениями технического усовершенствования МРТ являются: внедрение быстрых методик исследования, использование специальных технологий управления контрастом изображения, разработка методов исследования функциональных изменений органов и тканей, развитие инвазивных (интервенционных) методов диагностики и лечения с использованием МРТ.

В последние годы происходит вытеснение традиционно использовавшихся, но медленных режимов МРТ-исследования, основанных на импульсной последовательности обычного спинного эха (*SE*), более быстрыми режимами на основе последовательностей быстрого *SE*, градиентного эха (*GE*) и некоторых других. Быстрые и ультрабыстрые режимы МРТ перспективны для получения изображений сердца и выявления региональных нарушений движения его стенок в различные фазы сердечного цикла, исследований брюшной полости, изучения анатомо-функциональных нарушений в опорно-двигательном аппарате при динамическом исследовании движений, расширения области применения трехмерной МРТ, а также для проведения интервенционных процедур под контролем МРТ в реальном масштабе времени.

Режим быстрого *SE* (*RARE* — Rapid Acquisition with Relaxation Enhancement) позволяет уменьшить время получения T2-взвешенного изображения в 4-16 раз по сравнению с методикой обычного *SE*. Так, с помощью одной из



модификаций данного режима можно получить пакет изображений брюшной полости за время одной задержки дыхания. Режим малочувствителен к артефактам перистальтики, что позволяет использовать его даже для диагностики и определения уровня кишечной непроходимости.

Разработка быстрых последовательностей типа *RARE* и *GE* (например, *Flash — Fast Low Angle Shot Imaging*) способствовала широкому распространению различных модификаций трехмерной (*3D*) МРТ (не следует отождествлять данную методику с трехмерным представлением изображений изучаемого объекта). Без применения ускоренных методик регистрация данных, получаемых при трехмерной томографии, требует неприемлемых для клиники затрат времени (до нескольких часов).

*3D*-томография на основе градиентного эха позволяет получать T1 - взвешенные изображения хорошего качества и с высоким пространственным разрешением.

Данная методика применяется для выявления тонких деталей анатомического строения и мелких патологических образований, особенно при одновременном использовании контрастного усиления. В связи с хорошей контрастностью серого и белого вещества мозга возможно выявление даже незначительных нарушений дифференцировки коры мозга, что нередко является причиной развития эпилепсии. В трехмерном режиме с использованием контрастного усиления и методики подавления сигнала жира хорошо выявляются изменения хрящей и других тканевых компонентов суставов, а также ранние стадии опухолей молочной железы. Имеются данные о перспективности использования данной методики для диагностики мелких сосудистых мальформаций и аномалий развития структур внутреннего уха.

Большое значение для повышения диагностических возможностей МРТ имеет разработка методик, основанных на использовании новых принципов естественного контрастирования биологических тканей. Широко используемые для выявления патологических изменений T2-взвешенные изображения, не всегда позволяют с достаточной надежностью различать зоны поражения и некоторые нормальные ткани. Так, на T2-взвешенных изображениях зоны патологических изменений вещества мозга часто имеют высокий сигнал и выглядят как более яркие участки. Аналогичный высокий сигнал имеет также нормальная спинномозговая жидкость, что затрудняет выявление патологических очагов, располагающихся около пространств, заполненных данной жидкостью. Для преодоления данного недостатка разработана методика *FLAIR* (*Fluid Attenuated Inversion Recovery*), обеспечивающая подавление сигнала свободной воды (спинномозговой и некоторых других физиологических жидкостей) при сохранении базовой T2-взвешенности изображения. *FLAIR* лучше выявляет очаговые изменения мозга при рассеянном склерозе (склеротические бляшки), особенно при их корковой локализации.

Но, вероятно, этим не ограничивается преимущество данной методики по сравнению с *SE* импульсными последовательностями. При изменении параметров *FLAIR*, особенно времени инверсии, могут выявляться особенности

внутренней структуры бляшки, в частности, ее кольцевидная форма. Данная методика лучше, чем *SE* режимы, выявляет корковые инфаркты, граничащие со спинномозговой жидкостью.

Использование *FLAIR* существенно улучшает МРТ-диагностику субарахноидальных кровоизлияний, при этом выявляемость данной формы патологии, в том числе и в более отдаленные сроки заболевания, превышает таковую для рентгеновской *КТ*. МРТ в режиме *FLAIR* предлагается как первый диагностический метод для больных с подозрением на субарахноидальное кровоизлияние, в частности, на догоспитальном этапе диагностики. Данная методика перспективна также для диагностики заболеваний спинного мозга и мочевыделительной системы.

Аналогичный принцип применяется для подавления сигнала жира, который на T1 -взвешенных изображениях имеет высокую интенсивность, что может затруднять выявление патологических изменений с более низким сигналом. Данная методика (*STIR* -Short TR Inversion Recovery) эффективна для выявления опухолей определенных локализаций, исследования суставов и диагностики заболеваний зрительного нерва и печени.

Более избирательное выделение различных физико-химических компонентов тканей достигается с помощью томографии химического сдвига, основанной на регистрации спектров ЯМР для каждого объемного элемента изучаемого объекта с последующим построением селективного по химическому сдвигу изображения. Данный метод применяется в биомедицинских исследованиях для получения раздельного изображения воды и жира в исследуемой области. Возможно также построение изображений распределения и других метаболитов в биологических тканях (метод метаболических карт).

На стадии клинической апробации находится методика получения изображений на основе переноса намагниченности - - *MTI* (Magnetization Transfer Imaging), в основе которой лежит выявление характера взаимодействия между водой и биологическими макромолекулами. Контраст изображений, полученных с помощью методов *MTI*, отражает соотношение и биофизическое взаимодействие между свободной водой и водой, связанной с биомолекулами. Использование *MTI* повышает чувствительность *МРТ-методов* при патологических процессах, связанных с деструкцией клеточных мембран и изменением характера связи воды с белками. Важным преимуществом *MTI* является возможность объективной количественной оценки результатов с помощью величины, называемой отношением переноса намагниченности.

Методика *MTI* оказалась более чувствительной к изменениям белого вещества мозга у больных рассеянным склерозом, чем остальные методики МРТ, используемые для диагностики данного заболевания. Имеются предварительные данные о различиях по отношению переноса намагниченности между поражениями белого вещества сосудистого и воспалительного характера, требуют уточнения данные о возможности диагностики астроцитом, гемангиобластом и краниофарингеом, а также прогрессирующей мультифокальной лейкоэнцефалопатии и начальных стадий развития катаракты хрусталика. Пред-

ставляется перспективным использование данного принципа для точного определения границ опухолей головного мозга и для повышения эффективности контрастного усиления использования препаратов парамагнетиков при некоторых формах патологии. Использование метода переноса намагниченности при магнитно-резонансной ангиографии позволяет существенно улучшить качество ангиографических изображений. Важно отметить, что это позволяет на томографах со средними полями получать ангиограммы, не уступающие по качеству таковым, полученным на томографических системах с высокими полями. В настоящее время диагностическое значение *МТТ* еще недостаточно определено, но несомненно большое исследовательское значение данной методики для уточнения состояния тканевых структур при различных патологических процессах, особенно в их динамике.

Значительный интерес для решения ряда исследовательских, а в перспективе и диагностических задач, представляют методы диффузионновзвешенной *МРТ*. Данная группа методов требует применения специальных импульсных последовательностей и позволяет получать изображения, контраст которых в основном определяется скоростью диффузии воды в тканях. Показано, что диффузионно-взвешенная томография обладает высокой чувствительностью к изменениям макроструктурной (надмолекулярной) организации тканей.

Одной из перспективных областей диагностического использования данных методик является острый ишемический инсульт. Обычные *МРТ*-методики выявляют зону ишемического поражения мозга лишь через несколько часов от начала инсульта. На диффузионно-взвешенных изображениях эта зона выявляется через несколько минут, при этом, особенно в сочетании с магнитнорезонансной спектроскопией, возможна дифференцировка между участками с необратимым и потенциально обратимым повреждением нервных клеток в зоне ишемии, что весьма важно для определения плана лечения больных. При некоторой модификации методики исследования на диффузионновзвешенных изображениях можно получить отражение хода проводящих путей мозга, что получило название *МР*-аксонографии. Аналогично в мышечной ткани можно определить ход мышечных волокон.

Новым этапом в изучении мозга в норме и патологии явилась разработка методик функциональной *МРТ*, основанных на очень быстрых импульсных последовательностях. Данные методики позволяют оценивать быстрые локальные изменения тканевой перфузии, связанные с функциональной активацией структур мозга при психических процессах. Эксперименты по функциональной *МРТ* обычно проводятся на высокопольных томографах (1,5 Тесла и выше) и требуют специального оборудования для реализации сверхбыстрых импульсных последовательностей, например, эхо-планарной последовательности (*EPI*), что ограничивает их широкое применение. В то же время, имеются обнадеживающие данные о возможности реализации ряда методик функциональной *МРТ* на модифицированных рутинных томографах с полем 0,5 Тесла. Это позволяет надеяться на более быстрое внедрение методик функциональной *МРТ* в клиническую практику.

Наряду с созданием новых импульсных последовательностей, ведется разработка способов повышения диагностической эффективности обычных методик *MPT* исследования. Предложены специальные, регистрирующие *MP*-сигнал, катушки, позволяющие повысить пространственное разрешение или исследовать зоны, ранее малодоступные для *MPT*. С помощью катушки, вводимой в прямую кишку, достигается высокая точность выявления патологических изменений и определения стадии развития опухолей в данной области, в частности, рака предстательной железы. Проходят испытания катушки в виде катетеров, с помощью которых можно изнутри уточнить состояние стенок крупных сосудов, например, аорты. Разработаны поверхностные катушки, которые позволяют получать пространственное разрешение менее 1 мм для глаза и менее 0,1 мм для кожи.

Не прекращается разработка новых контрастных препаратов для *MPT*. Создание низкоосмолярных *MP*-контрастных препаратов позволяет при необходимости увеличивать их дозировку, что может быть полезным для выявления новых зон поражения мозга при рассеянном склерозе и метастазах опухолей, а также для более четкого определения границ ряда внутримозговых опухолей. Помимо создания препаратов для введения в кровь, разрабатываются новые способы инфузионного контрастирования полых органов и дыхательной системы. Весьма перспективен в данном направлении метод визуализации легких, основанный на вдыхании изотопов инертных газов с гиперполяризованными ядрами (предложены к применению гелий  $^3\text{He}$  и ксенон  $^{129}\text{Xe}$ ). Данная технология еще недоступна для клинического применения в связи со значительными техническими трудностями ее проведения, но она открывает перспективы использования *MPT* для диагностики заболеваний легких, которые обычно считаются органом, недоступным для *MPT* исследования.

Можно полагать, что в ближайшие годы будут разработаны и другие, возможно, принципиально новые подходы к повышению диагностической эффективности *MP* методов исследования.

Источник: [www. nmrnews.ru](http://www.nmrnews.ru)

## **8.6. Методы расчета магнитных индукторов**

В данном разделе приведен ряд экспериментальных данных при расчете и исследовании различных вариантов индукторов.

### **8.6.1. Расчет магнитной цепи и экспериментальное исследование характеристик электромагнитных дросселей индуктора**

#### **Расчет магнитной цепи**

Цель: Определить необходимую намагничивающую силу и параметры обмотки, расположенной на стержне магнитопровода с заданными геометри-

ческими размерами, для создания в воздушном зазоре на удалении 50 мм от поверхности магнитопровода — магнитной индукции величиной 5 мТл.

Исходные данные:

Магнитная индукция в воздушном зазоре

Величина воздушного зазора магнитопровода — 0.03 м.

Длина средней магнитной силовой линии воздушного зазора магнитопровода — 0.05 м.

Площадь поперечного сечения воздушного зазора магнитопровода — 0,0012 м<sup>2</sup>

Длина средней магнитной силовой линии в сердечнике магнитопровода - 0.149 м.

Площадь поперечного сечения магнитопровода

Рабочий диапазон частот 1-400 Гц.

Магнитопровод — Сердечник трансформатора, выполненный из листовой электротехнической стали

### **8.6.2. Величина магнитного поля постоянного магнита в зависимости от удаленности от магнитопровода**

Исследование значений магнитного поля магнита в зависимости от удаленности от магнитопровода проводилось на постоянном магните тороидальной формы от точки, имеющей наибольшую магнитную индукцию у поверхности магнитопровода в направлении перпендикулярному к плоскости магнитопровода.

*Таблица 1*

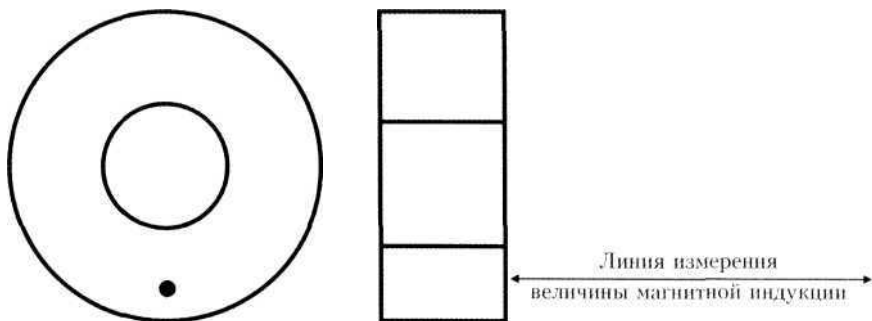
#### **Значения магнитной индукции постоянного магнита в зависимости от расстояния от магнитопровода**

| Расстояние S, mm | 0    | 5    | 10   | 20   | 30  | 40  | 50  | 60  | 70  | 80  |
|------------------|------|------|------|------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| Индукция В, мТл  | 53,6 | 29,4 | 19,6 | 10,8 | 6,2 | 3,7 | 2,2 | 1,0 | 0,3 | 0,2 |

График значений магнитной индукции в зависимости от расстояния от магнитопровода.

Вывод: Анализ значений магнитной индукции в зависимости от расстояния от магнитопровода показывает, что зависимость носит явно выраженный экспоненциальный характер. На удалении 50 мм значение индукции составляет 2.2 мТл, что приблизительно в 25 раз меньше значения индукции у поверхности магнитопровода. Следовательно для создания магнитной индукции на удалении 50 мм равной 5 мТл, необходимо у поверхности индуктора создать магнитную индукцию порядка 125 мТл.





### 8.6.3. Определение намагничивающей силы и параметров обмотки

#### Габаритные размеры сердечника трансформатора

Сердечник трансформатора выполнен из листовой электротехнической стали.

Пунктирной линией показана средняя магнитная силовая линия в сердечнике магнитопровода и воздушном зазоре.



#### Геометрические размеры магнитопровода

Длина средней магнитной силовой линии в сердечнике магнитопровода:

$$L_m = 41 \cdot 2 + 27 + 20 \cdot 2 = 149 \text{ мм.} = 0.149 \text{ м}$$

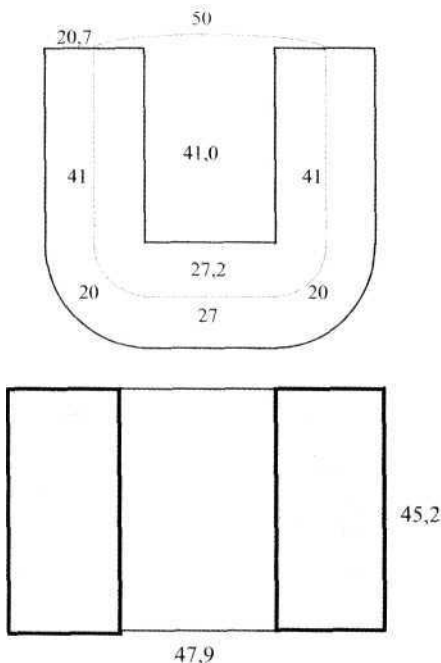
Длина средней магнитной силовой линии воздушного зазора магнитопровода:

$$L_0 = 0.05 \text{ м.}$$

Площадь поперечного сечения воздушного зазора магнитопровода:

$$S_0 = 0,045 \cdot 0,027 = 0,001215 \text{ м}^2$$

Площадь поперечного сечения магнитопровода:



$$Sm = 0,021 \cdot 0,045 = 0,000945 \text{ м}^2$$

Магнитный поток в воздушном зазоре:

$$\Phi_0 = B_0 \cdot S_0 = 0.125 \cdot 0.001215 = 0,000151875 \text{ Вб}$$

где:  $B_0$  — Магнитная индукция в воздушном зазоре, 0.125 Тл

$S_0$  — Площадь воздушного зазора магнитопровода 0.001215 м.

Принимаем магнитный поток на всех участках магнитопровода одинаковым, тогда индукция в магнитопроводе составит:

$$Bm = \Phi_0 / Sm = 0,000151875 / 0,000945 = 0,161 \text{ Тл}$$

где:  $\Phi_0$  — Магнитный поток в воздушном зазоре.

$Sm$  — Площадь сечения магнитопровода.

По кривой намагничивания (зависимости магнитной индукции от напряженности магнитного поля) для электротехнической стали при значении индукции 0.161 Тл. значение напряженности равно 100 А/м.

Таблица 2

### Зависимость магнитной индукции от напряженности магнитного поля

| Напряженность, А\м       | 0 | 0,75 | 1,5  | 3    | 6    | 9    | 12  | 27   |
|--------------------------|---|------|------|------|------|------|-----|------|
| Пермандюр                | 0 | 1,2  | 1,45 | 1,7  | 2    | 2,15 | 2,2 | 2,35 |
| Низкоуглеродистая сталь  | 0 | 1    | 1,2  | 1,25 | 1,4  | 1,45 | 1,5 | 1,6  |
| Электротехническая сталь | 0 | 0,8  | 0,9  | 1    | 1,15 | 1,25 | 1,3 | 1,45 |
| Пермалой марки 79НМ      | 0 | 0,65 | 0,7  | 0,75 | 0,8  | 0,95 | 1   | 1,05 |

Напряженность магнитного поля в воздушном зазоре.

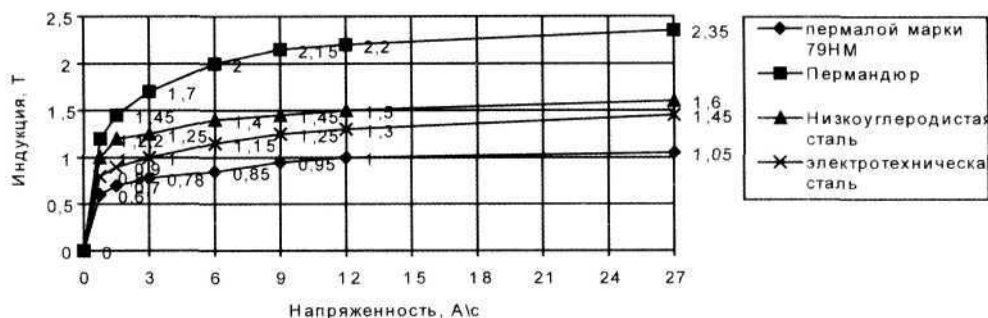
$$H_0 = B_0 / \mu_0 = 0.125 / 1.256 \cdot 10^{-6} = 99522 \text{ А/м}$$

где:  $H_0$  — напряженность магнитного поля в воздушном зазоре, А/м.

$B_0$  — магнитная индукция в воздушном зазоре, 0.125 Тл.

$\mu_0$  — магнитная постоянная вакуума,  $1.256 \cdot 10^{-6}$

### Зависимость магнитной индукции от напряженности



На основании закона полного тока магнитной цепи определяем намагничивающую силу:

$$I w = H_m \cdot l_m + H_0 \cdot l_0$$

$$I w = 100 \cdot 0,149 + 99522 \cdot 0,05 = 14,9 + 4976,1 = 4991 \text{ А} \cdot \text{В}$$

где:  $I$  — Значение тока через катушку, А.

$w$  — Количество витков катушки.

$H_m$  — Напряженность магнитного поля в магнитопроводе, А/м.

$l_m$  — Длина магнитопровода, 0,149 м.

$H_0$  — Напряженность магнитного поля в воздушном зазоре, А/м.

$l_0$  — Воздушный зазор, 0,05 м.

Приняв намагничивающий ток в обмотке равным 10А, получим что для создания намагничивающей силы 4991 А·В необходимо 499 витков в обмотке катушки. Следует иметь ввиду, что это будет максимальное значение магнитной индукции. Значения индуктивности и активного сопротивления дросселей в зависимости от размера сердечника и количества витков.

Таблица 3.

### Зависимость индуктивности и активного сопротивления дросселя Др1 от размера сердечника и количества витков

| 1-ый дроссель Др1. Диаметр провода = 1 мм, Размеры железа сердечника броневого типа = 40*75*50. Размеры стержня = 22*42*40. |                    |                            |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------|----------------------------|
| Количество витков                                                                                                           | Индуктивность, Гн. | Активное сопротивление, Ом |
| W1=120                                                                                                                      | 0,0038             | 0,34                       |
| W2=70                                                                                                                       | 0,001              | 0,21                       |
| W1+W2=190                                                                                                                   | 0,0086             | 0,52                       |

Таблица 4

**Зависимость индуктивности и активного сопротивления дросселя  
Др.2 от размера сердечника и количества витков.**

| 2-ой дроссель Др2. Диаметр провода = 1.3мм, Размеры железа сердечника броневого типа = 55*80*60. Размеры стержня = 19*50*50. |                           |                                   |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------|-----------------------------------|
| <b>Количество витков</b>                                                                                                     | <b>Индуктивность, Гн.</b> | <b>Активное сопротивление, Ом</b> |
| <b>W1=120</b>                                                                                                                | 0,0038                    | 0,22                              |
| <b>W2=90</b>                                                                                                                 | 0,0024                    | 0,20                              |
| <b>W1+W2=210</b>                                                                                                             | 0,012                     | 0,42                              |

Таблица 5

**Расчет значений индуктивного сопротивления дросселей в зависимости  
от частоты питающего напряжения и количества витков**

| <b>Частота, Гц.</b> | <b>Индуктивное сопротивление, ом<br/>Др1. W=190 витков.</b> | <b>Индуктивное сопротивление, ом<br/>Др2. W=210 витков.</b> |
|---------------------|-------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------|
| 1                   | 0,054                                                       | 0,075                                                       |
| 10                  | 0,540                                                       | 0,753                                                       |
| 50                  | 2,702                                                       | 3,769                                                       |
| 100                 | 5,403                                                       | 7,539                                                       |
| 200                 | 10,807                                                      | 15,079                                                      |
| 400                 | 21,614                                                      | 30,159                                                      |
| 1000                | 54,035                                                      | 75,398                                                      |

Индуктивность катушки цилиндрической:

$$L = \mu_0 \mu w^2 S / l = 0.001$$

где:  $\mu_0$  — магнитная постоянная вакуума,  $1.256 \cdot 10^{-6}$  Г/м

$\mu$  - относительная магнитная проницаемость

w — Число витков катушки, м

S — Площадь катушки, м<sup>2</sup>

l — Длина катушки, м

**Исследование значений магнитного поля дросселей в зависимости от величины питающего напряжения и количества витков**

| Тип дросселя                  | Напряжение, В | Ток, А | Частота, Гц | Магнитная индукция, мТл | Примечание         |
|-------------------------------|---------------|--------|-------------|-------------------------|--------------------|
| Др1 w= 190 без магнитопровода |               |        |             |                         |                    |
| Др1 w=190                     | 5             | 6      | 50          | 15-20                   | В середине катушки |
|                               |               |        |             | 10                      | На выходе катушки  |
|                               | >11           | >10    | 50          | 35                      | В середине катушки |
| Др1 w=190 с магнитопроводом   |               |        |             |                         |                    |
| Др1 w=190                     | 5,8           | 1,9    | 50          | 20                      |                    |
|                               | 12,5          | 4,0    | 50          | 50                      |                    |
|                               | 14            | 7,4    | 50          | 100                     |                    |
| Др2 w=210 с магнитопроводом   |               |        |             |                         |                    |
| Др2 w=210                     | 6             | 1,6    | 50          | 20                      |                    |
|                               | 12            | 3      | 50          | 40                      |                    |
|                               | 24            | 6      | 50          | 100                     |                    |
| Др2 w=120 с магнитопроводом   |               |        |             |                         |                    |
| Др2 w=120                     | 6             | 4      | 50          | 30                      |                    |
|                               | 12            | 8,2    | 50          | 70                      |                    |
|                               | 24            | >10    | 50          | 140                     |                    |

Примечание: Измерения магнитной индукции производились Миллитесламетром Ф4356, предназначенным для измерения среднего значения индукции переменного магнитного поля в воздушных зазорах 1 мм и более. Пределы измерения 1-100 мТл.

Анализ значений, представленных в таблицах 3-6: "Зависимость индуктивности и активного сопротивления дросселя от размера сердечника и количества витков", "Расчет значений индуктивного сопротивления дросселей в зависимости от частоты питающего напряжения и количества витков", "Исследование значений магнитного поля дросселей в зависимости от величины

питающего напряжения и количества витков" можно сделать следующий вывод:

Так как амплитудно — частотная характеристика зависит прямо пропорционально от индуктивного сопротивления дросселя, которое в свою очередь носит квадратичную зависимость от количества витков катушки, тогда с целью улучшения амплитудно — частотной характеристики следует снижать количества витков катушки, однако это приведет к снижению намагничивающей силы, поэтому наиболее оптимальным вариантом является вариант, при котором индуктор будет выполнен из 6 катушек, каждая из которых содержит по 80 витков. При этих параметрах достигается постоянное значение амплитуды тока в диапазоне от 1 до 300 Гц.

#### 8.6.4. Поле в пространстве

##### Зависимость магнитной индукции от количества витков катушки

| Наименование измеряемого параметра                                              | Количество витков катушки.<br>Диаметр провода 1 мм |      |      |     |     |      |      |      |
|---------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------|------|------|-----|-----|------|------|------|
|                                                                                 | 28                                                 | 48   | 56   | 74  | 84  | 112  | 132  | 160  |
| Магнитная индукция, мТл.                                                        | 18                                                 | 23,5 | 25,5 | 22  | 24  | 23,5 | 22,5 | 21,5 |
| Амплитуда сигнала на выходе датчика Холла мили тесла метра, размах сигнала, мВ. | 531                                                | 661  | 724  | 695 | 829 | 1010 | 1150 | 1210 |
| Падение напряжения на измерительном токовом шунте 0,1 ом, размах сигнала, мВ.   | 9/5                                                | 716  | 641  | 475 | 455 | 348  | 242  | 203  |
| Напряжение источника питания, В                                                 |                                                    |      |      |     |     |      |      | 19,3 |

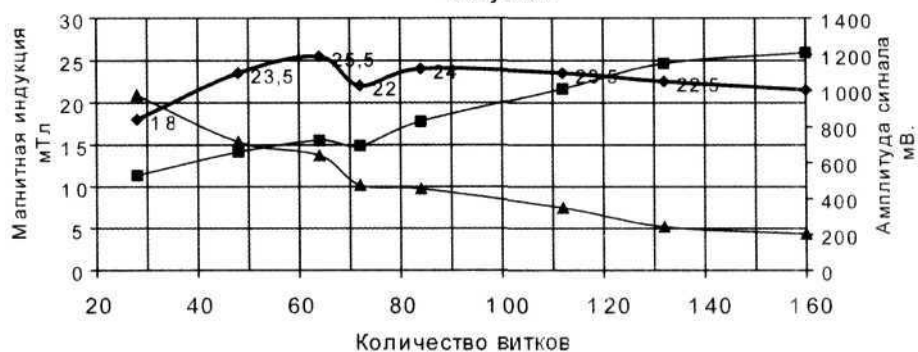
Примечание:

Исследования проводились при следующих условиях:

Магнитное поле катушки индуктора формировалось усилителем мощности ОртоСПОК при значении мощности 100%.

Прибор ОртоСПОК подключался к сети через разделительный трансформатор мощностью 250 Вт.

### Зависимость магнитной индукции от количества витков катушки



- ◆ Магнитная индукция, мТл.
- Амплитуда сигнала на выходе датчика Холла мили тесла метра, размах сигнала
- ▲ Падение напряжения на измерительном токовом шунте 0,1 ом, размах сигнала

### Исследование зависимости магнитной индукции в зависимости от количества витков катушки

| Наименование измеряемого параметра                                              | Количество витков катушки.<br>Диаметр провода 1,92 мм. |      |     |      |
|---------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------|------|-----|------|
|                                                                                 | 64                                                     | 101  | 90  | 128  |
| Магнитная индукция, мТл.                                                        | 26,5                                                   | 23,5 | 25  | 22   |
| Амплитуда сигнала на выходе датчика Холла мили тесла метра, размах сигнала, мВ. | 647                                                    | 820  | 748 | 953  |
| Падение напряжения на измерительном токовом шунте 0,1 ом, размах сигнала, мВ.   | 876                                                    | 550  | 687 | 425  |
| Напряжение источника питания, В.                                                | 19                                                     | 19   | 19  | 19,5 |

Примечание:

Исследования проводились при следующих условиях:

Магнитное поле катушки индуктора формировалось усилителем мощности ОртоСПОК при значении мощности 100%.

Прибор ОртоСПОК подключался к сети без разделительного трансформатора.

## 8.6.5. Индуктор "Манжетка"

Индуктор предназначен для воздействия магнитным полем специальной формы на участок тела пациента с целью стимуляции тканей посредством улучшения микро циркуляции и повышения проницаемости мембран в зоне воздействия.

Конструктивно индуктор выполняется в виде манжетки, внутрь которого встроены катушки излучателя.

Количество катушек индуктора — 5

Размещение катушек — Равномерно по полю поверхности манжетки.

Сопротивление индуктора, Ом, не более — 1

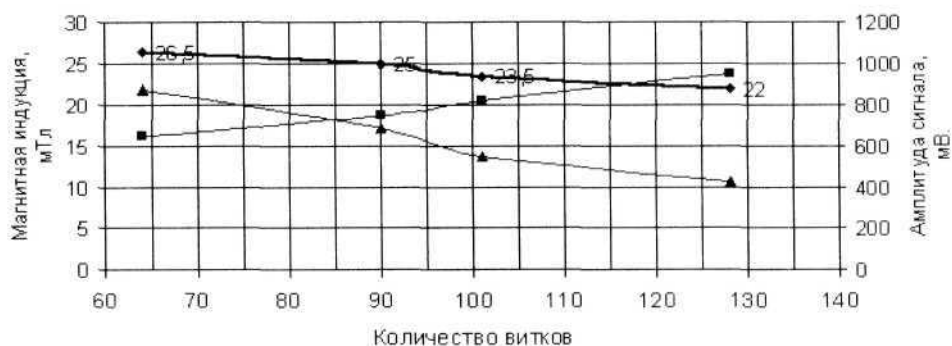
Форма сигнала представляет собой повторно — кратковременную последовательность зависимости амплитуды сигнала от времени: Длительность сигнала 55-60 мл/сек. Длительность паузы 40-45 мл/сек. Сигнал содержит в себе частоты от 10 до 400 Гц. Максимальная амплитуда тока, А, не более — 10.

**Данные катушки L1-L5**

| Параметр                   |     |       |           |     | Сопротивление |       |      |      |
|----------------------------|-----|-------|-----------|-----|---------------|-------|------|------|
|                            | D1, | wl    | D2,<br>L1 | Ra  | L             | RI    | Z    |      |
|                            | mm  | Витки | mm        | m   | Om            | mkH   | Om   | Om   |
| Одна катушка               | 0,5 | 50    | 32        | 5,0 | 0,568         | 122,0 | 0,08 | 0,57 |
| Одна катушка с сердечником |     |       |           |     | 0,568         | 186   | 0,12 | 0,58 |
| 2 катушки последовательно  |     |       |           |     | 1,19          | 239   | 0,15 | 1,20 |
| 3 катушки последовательно  |     |       |           |     | 1,78          | 357   | 0,22 | 1,79 |
| 5 катушек последовательно  |     |       |           |     | 2,83          | 595   | 0,37 | 2,85 |



### Зависимость магнитной индукции от количества витков



- Магнитная индукция, мТл.
- Амплитуда сигнала на выходе датчика Холла мТл метр, размах сигнала, мВ.
- ▲— Падение напряжения на измерительном токовом шунте 0,1 ом, размах сигнала, мВ.

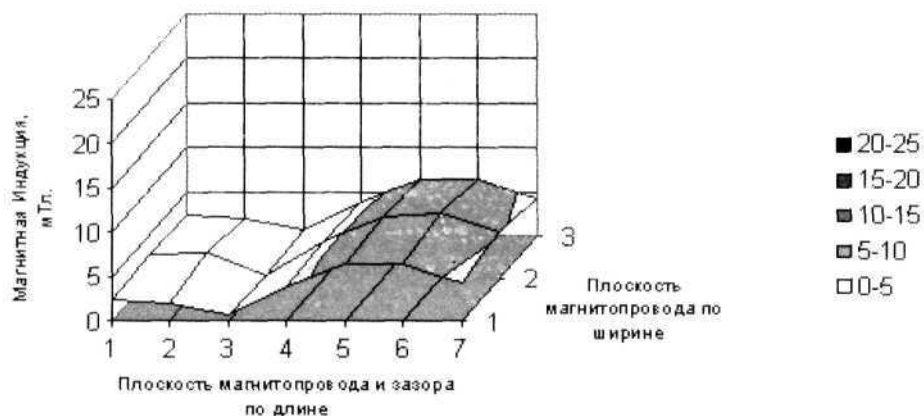
### Пространственное значение магнитной индукции у поверхности магнитопровода.



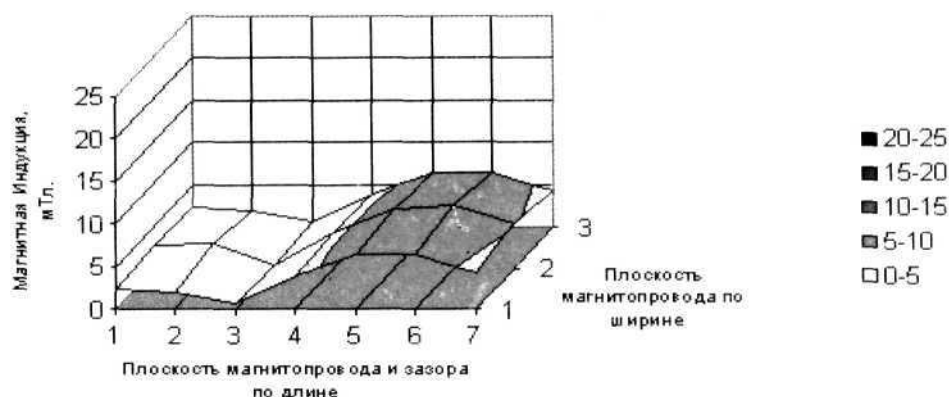
Пространственное значение магнитной индукции  
на расстоянии 8,3 мм от поверхности магнитопр



Пространственное значение магнитной индукции  
на расстоянии 17 мм от поверхности магнитопровода.



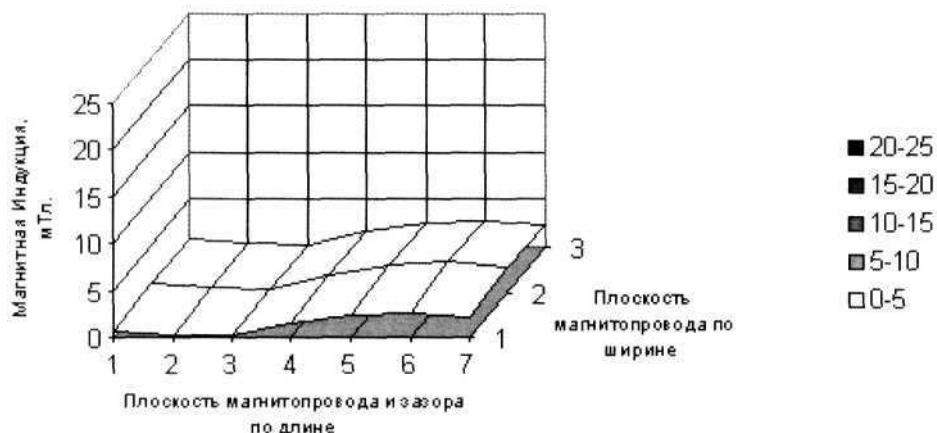
Пространственное значение магнитной индукции  
на расстоянии 17 мм от поверхности магнитопровода.



Пространственное значение магнитной индукции  
на расстоянии 24,5 мм от поверхности магнитопровода.



Пространственное значение магнитной индукции  
на расстоянии 34 мм от поверхности магнитопровода.

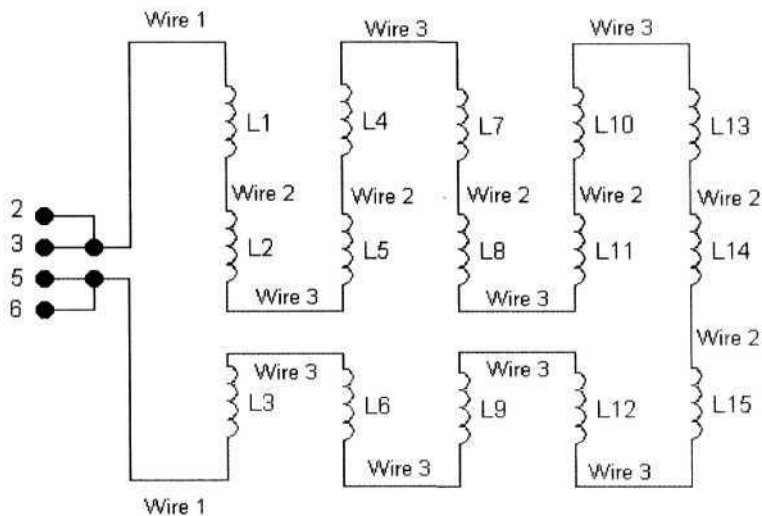


Измеренные значения магнитной индукции

| Параметр                                                                    | Р, % | I, А | В, д1<br>мТл |
|-----------------------------------------------------------------------------|------|------|--------------|
| Включены катушки L1-L5 последовательно.                                     | 80   | 3,87 | 1,7          |
|                                                                             | 100  | 4,18 | 2,1          |
|                                                                             | 120  | 4,16 | 2,35         |
| Включены катушки L1-L5 последовательно. В одну из катушек введен сердечник. | 100  | 4,5  | 3,5          |

### 8.6.6. Индуктор модели "Стимулирующий мат"

Конструктивно индуктор модели "Стимулирующий мат" выполняется в виде мата, внутрь которого встроены катушки излучателя. Габаритные размеры, мм, — 850\*2000. Действующее значение магнитной индукции у поверхности мата, мТл, не более — 0,5. Количество катушек индуктора — 15. Размеще-



ние катушек — Равномерно по полю поверхности мата. Сопротивление индуктора, Ом, не более — 1. Форма сигнала подобна, как и в индукторе "Манжетка". 15 катушек проводом ПГВА-0.75 (11 витков), длина провода на 15 катушек и меж катушечные соединения =35,2м. Провод до разъема ШВВП-2-0,75, 1,75м,

| Параметр | Ra   | L   | P, % | В, д2 | В, имп | Примечание |
|----------|------|-----|------|-------|--------|------------|
|          | Ом   | мкН |      | мТл   | мТл    |            |
|          | 0,85 | 140 | 120  | 0,66  | 3,03   |            |

### 8.6.7. Магнитная индукция излучателя типа "Чашка"

Основные сведения о катушках индуктивности с ферритовыми сердечниками.

#### Выбор формы и типоразмера сердечника

Одной из важнейших задач разработчиков катушек индуктивности является получение высокой добротности при возможно малом объеме катушки, объем катушки будет определяться также параметрами обмотки, а именно:

сопротивлением провода, коэффициентом заполнения обмотки медью и, наконец, частотой, на которой используется катушка.

При выборе формы сердечника должны быть рассмотрены многие факторы, такие, например, как особенности применения катушки, тип крепления сердечника, окружающие условия, габариты и цена. В технических условиях на катушку индуктивности, кроме требуемого значения индуктивности и допуска на нее, обычно указывают рабочую частоту, уровень напряжения и

величину постоянного тока (ток подмагничивания), протекающего через катушку.

Размер сердечника определяется в первую очередь величиной заданной индуктивности, т. е. объемом намотки (числом витков провода определенного диаметра).

## **Провода и обмотки**

Обмотка катушки индуктивности выполняется преимущественно из медного изолированного провода круглого сечения. Для предотвращения повреждения изоляции в процессе намотки обычно используются провода с двойной или многослойной изоляцией.

Переменный ток, протекающий по проводу, создает переменное магнитное поле, которое индуцирует вихревые токи в самом проводе. Наличие вихревых токов вызывает рассеивание мощности, в результате чего сопротивление провода переменному току будет больше его сопротивления постоянному току. Кроме того, изменяется распределение тока в проводе, так как вихревые токи уменьшают основной ток в центральной части провода и увеличивают его вблизи поверхности. Следовательно, плотность тока увеличивается по направлению к поверхности провода. Это явление становится все более и более заметным с увеличением частоты, а при относительно высоких частотах ток будет течь в тонком наружном поверхностном слое, тогда как плотность тока в центральной части провода уменьшится практически до нуля. При высоких частотах сплошной провод имеет практически такое же сопротивление, как полая трубка того же наружного диаметра. Сопротивление в этом случае обратно пропорционально не площади сечения провода, а его диаметру. Отсутствие тока в центральной части провода означает соответствующее отсутствие магнитного поля. Таким образом, вихревые токи, индуцированные текущим в проводе переменным током, стремятся предотвратить образование магнитного поля внутри провода, т. е. создают эффект магнитного экранирования.

При низких частотах, когда глубина проникновения велика, сопротивление провода переменному току практически то же самое, что и постоянному току.

## **Типы обмоток**

Однослойная (соленоидная) обмотка. Этот тип обмотки обеспечивает наименьшую величину индуктивности. Вместе с тем обмотка имеет очень малую величину распределенной емкости и хорошую теплоотдачу, так как воздух движется над всей ее площадью. Для намотки однослойных катушек применяется, как правило, сплошной провод.

Катушка с многослойной обмоткой обеспечивает большую величину индуктивности по сравнению с однослойной обмоткой. В многослойной катушке промежуток между витками обычно достаточно мал и индуктивность не зависит от него, а определяется только числом витков и размерами обмотки.

Многослойная обмотка используется как на низких, так и на высоких частотах. При более высоких частотах большая распределенная емкость между витками значительно ограничивает частотный предел ее применения. Для уменьшения распределенной емкости многослойную обмотку разделяют на секции.

## **Расчет числа витков и выбор провода**

Очевидно, что обмоточное пространство катушки не может быть сплошь заполнено медью. Число витков, которое можно поместить на 1 см поперечного сечения намоточного пространства, зависит не только от диаметра провода, но также и от вида изоляции, способа намотки и определяется коэффициентом заполнения обмотки медью, который равен отношению общего сечения меди обмотки к площади окна обмотки.

Коэффициент заполнения является величиной, не поддающейся точному расчету. Он колеблется от 0,5 до 0,2 при переходе от более толстых обмоточных проводов (диаметр 1—1,5 мм) к более тонким (диаметр 0,1 — 0,2 мм).

Выбор диаметра и марки провода определяется числом витков, размерами сердечника и назначением катушки.

## **Сердечники броневого из ферритов ряда Б**

Броневого сердечник типа Б состоит из двух чашек и подстроечного сердечника. Выпускается взамен ранее существовавшего ряда ОБ. В соответствии с ГОСТ 19197-73 конструкция и размеры чашек даны на рисунке и в таблице. Чашка состоит из центрального керна с отверстием и наружного цилиндрического кольца (мантии), на котором предусмотрены один или два выреза для выводов концов обмотки.

В броневого сердечниках типа Б паз служит для уменьшения вихревых токов, особенно в сердечниках из марганцево-цинковых ферритов, обладающих большой электропроводностью. Используемая обмотка может быть бескаркасной. Сквозной паз дает возможность располагать вывод обмотки на любом ее участке, что увеличивает коэффициент заполнения окна сердечника.

| Тип | d1,mm | d2,mm | d3,mm | d4,mm | h1,mm | h2,mm | К   |
|-----|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-----|
| Б30 | 31,2  | 24,6  | 12,8  | 5,2   | 9,5   | 6,5   | 0,1 |
| Б36 | 36,2  | 29,9  | 16,2  | 5,4   | 11    | 7,3   | 0,1 |
| Б42 | 43,1  | 35,6  | 17,7  | 5,4   | 14,9  | 10,2  | 0,1 |
| Б48 | 48,7  | 39,5  | 20,4  | 7,3   | 15,9  | 10,3  | 0,1 |

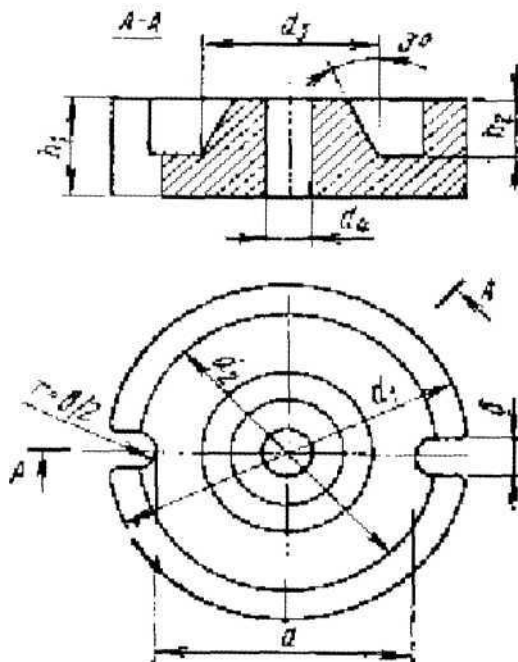
Сердечники чашечные броневого ряда ОБ из ферритов марок 2000НМ, 2000НМ1, 1500НМ

Чашечные броневые сердечники из феррита марок 2000НМ, 2000НМ1 и 1500НМ2 применяются в слабых синусоидальных магнитных полях и предназначены для использования в качестве ЗИП в изделиях электронной техники - электротехники на частотах до 1000 кГц (! МГц). Чашечные сердечники предназначены для работы в элементах аппаратуры, эксплуатируются в интервале температур от -60 до +125°С при воздействии на элементы механических и климатических факторов по ГОСТ 25467—82

### Экспериментальные данные по индуктору типа "Чашка"

Данные катушек с учетом длины провода и разъема. Катушка помещена в чашку Б48.

| Номер эксперимента | D1,  | wl    | D2, L1 | Ra  | L     | RI    | Z    |      |
|--------------------|------|-------|--------|-----|-------|-------|------|------|
|                    | mm   | Витки | mm     | m   | Om    | mkH   | Om   | Om   |
| Эксперимент 1      | 0,5  | 50    | 30     | 4,7 | 0,612 | 377,0 | 0,24 | 0,66 |
| Эксперимент 2      | 0,85 | 90    | 30     | 8,5 | 0,328 | 696   | 0,44 | 0,55 |
| Эксперимент 3      | 0,9  | 80    | 30     | 7,5 | 0,293 | 500   | 0,31 | 0,43 |
| Эксперимент 4      | 1    | 50    | 30     | 4,7 | 0,168 | 269   | 0,17 | 0,24 |





D2 -- имеется ввиду средний диаметр витка катушки, укладываемой в чашку.

Измеренные значения магнитной индукции и тока

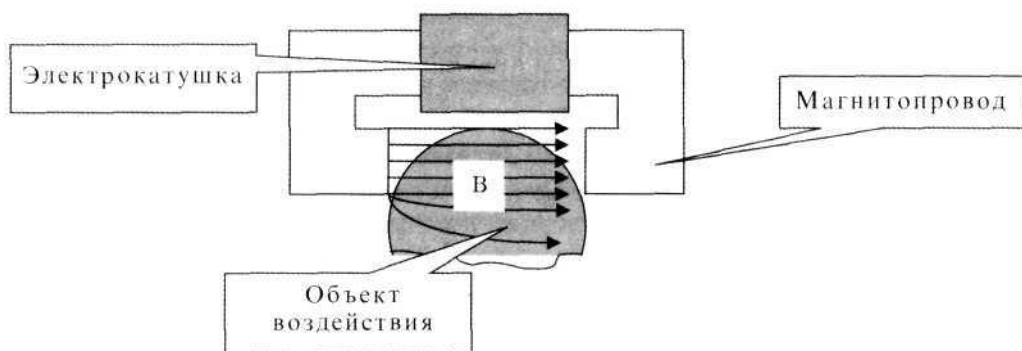
| Параметр      | P, % | I, A | B,<br>д1<br>мТл | B,<br>д2<br>мТл | B, или<br>мТл,<br>расчетное | Примечание                                                                                                  |
|---------------|------|------|-----------------|-----------------|-----------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Эксперимент 1 | 80   |      | 7,5             |                 | 41,25                       | Катушка сильно греется                                                                                      |
|               | 100  |      | 8,5             |                 | 46,75                       |                                                                                                             |
|               | 120  |      | 9,5             |                 | 52,25                       |                                                                                                             |
| Эксперимент 2 | 80   | 6,47 | 9,5             |                 | 52,25                       | Температура катушки вполне допустимая. Количество витков несколько многовато, можно уменьшить до 80 витков. |
|               | 100  | 7,91 | 11,5            |                 | 63,25                       |                                                                                                             |
|               | 120  | 9,37 | 13,5            |                 | 74,25                       |                                                                                                             |
| Эксперимент 3 | 80   | 6,72 | 10              |                 | 55                          | Температура катушки вполне допустимая.                                                                      |
|               | 100  | 8,23 | 12              |                 | 66                          |                                                                                                             |
|               | 120  | 9,69 | 14              |                 | 77                          |                                                                                                             |
| Эксперимент 4 | 80   | 6,82 | 6,5             |                 | 35,75                       | Катушка не греется. Количество витков несколько многовато, можно уменьшить до 45 витков.                    |
|               | 100  | 8,38 | 7,5             |                 | 41,25                       |                                                                                                             |
|               | 120  | 9,73 | 8,5             |                 | 46,75                       |                                                                                                             |

Наиболее оптимальный вариант по Эксперименту 3: т.е. Диаметр провода 0.8-0.9 мм, количество витков 75-80.

## 8.7. Исследование зависимости магнитной индукции от расстояния между подвижными магнитопроводами

Индуктор для формирования магнитного поля на объект, имеющий сферическую поверхность с радиусом закругления 150-200 мм.

Известно, что наиболее приемлемый вариант для получения максимально возможного поля является расположение торцов магнитопровода параллельно друг относительно друга. И при том, чем меньше расстояние между торцами, тем больше значение магнитной будет в воздушном зазоре. И соответственно наоборот.(рис.8.7.1).



Для исследования, проведена экспериментальная проверка зависимости магнитной индукции от расстояния между, при этом один из магнитопроводов был подвижными (См. Рис. 8.7.1. Схематический рисунок конструкции подвижного магнитопровода)

Таблица 7

**Зависимость магнитной индукции от расстояния между подвижными магнитопроводами**

| Наименование измеряемого параметра.                                           | Расстояние между магнитопроводами, мм. |      |      |      |      |      |      |      |      |      |     |     |
|-------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|-----|-----|
|                                                                               | 1                                      | 2    | 3    | 5    | 10   | 15   | 20   | 25   | 30   | 40   | 50  | 60  |
| Магнитная индукция, мТл.                                                      | 60                                     | 55   | 48   | 37   | 22   | 17   | 15   | 13   | 12   | 11,5 | 11  | 11  |
| Амплитуда сигнала на выходе датчика Холла милитесламетра. Размах сигнала, мВ. | 7300                                   | 5660 | 4300 | 2800 | 1640 | 1490 | 1250 | 1250 | 1120 | 1010 | 940 | 940 |
| Напряжение, В.                                                                | 19                                     | 19   | 19   | 19   | 19   | 19   | 19   | 19   | 19   | 19   | 19  | 19  |

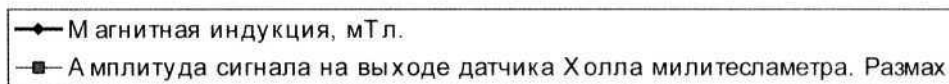
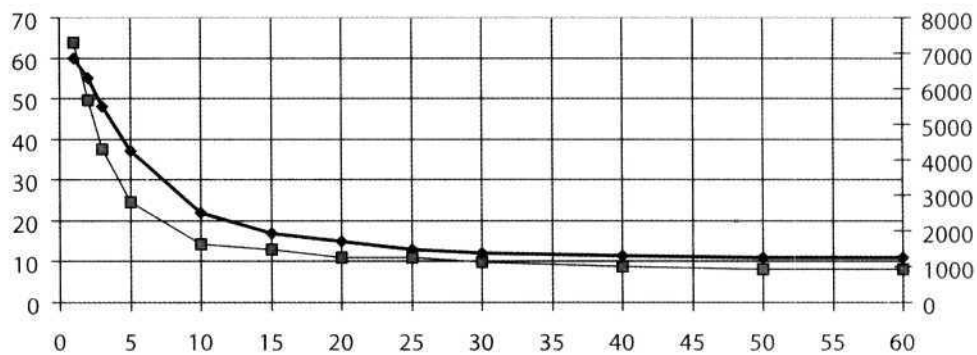
Анализ значений, представленных в таблице 1 и графика зависимости магнитной индукции от расстояния между подвижными магнитопроводами позволяет сделать следующий вывод:

Зависимость носит ярко выраженный экспоненциальный характер.

При изменении расстояния между магнитопроводами с 1 мм до 10 мм, магнитная индукция уменьшается в 3 раза. С 10 мм до 25 мм — уменьшается еще в два раза. А при изменении расстояния с 25 мм до 60 мм и далее, значение магнитной индукции практически не изменяется. Таким образом, расположение торцов магнитопроводов при большом расстоянии между ними, незначительно влияет на величину магнитной индукции. А это означает, что при большом расстоянии между торцами магнитопровода принципиально неважно расположение торцов магнитопровода относительно друг друга. И в данном случае основным фактором будет являться такое расположение магнитопроводов, при котором будет обеспечиваться оптимальное прилегание магнитопровода к поверхности с заданным радиусом закругления, как показано на рисунке 8.7.2.

Изготовление экспериментального образца с шириной торца магнитопровода 95 мм и углом между ними порядка 140 градусов обеспечило магнитную индукцию у поверхности магнитопровода в соответствии с таблицей 2.

| Ток                                              | 17,9 | 20,5 | 21,0 | 21,5 | 21,5 | 21,5 | 21,5 |
|--------------------------------------------------|------|------|------|------|------|------|------|
| Магнитная индукция у поверхности магнитопровода. | 58,0 | 63,3 | 65,7 | 66,5 | 67,9 | 67,9 | 68,0 |



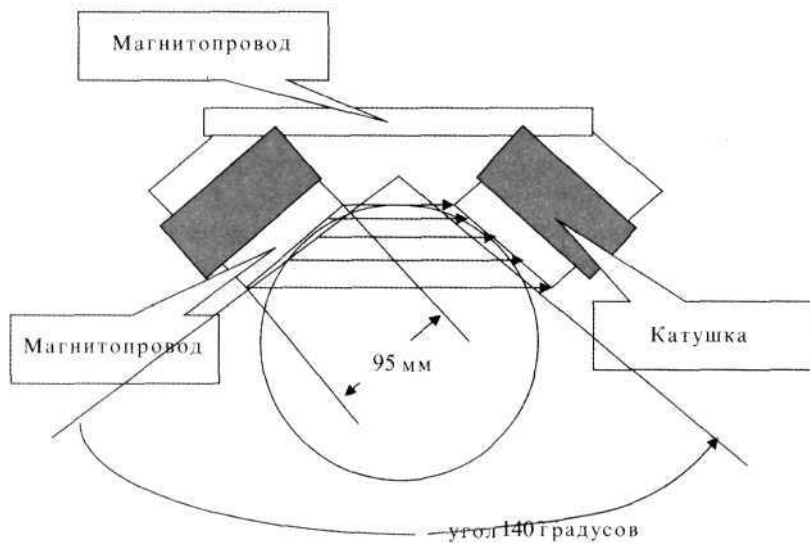


Рис.8.7.2

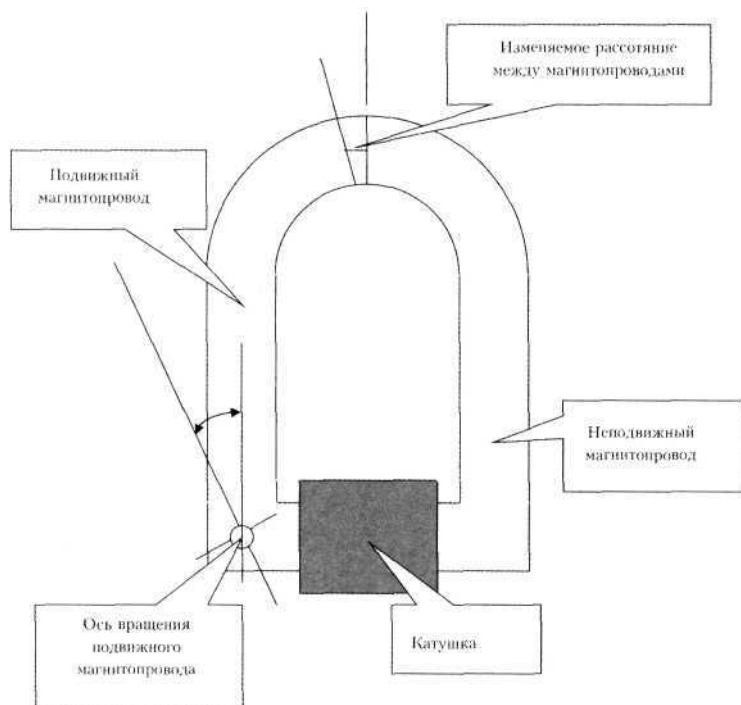


Рис. 8.7.3. Схематический рисунок конструкции подвижного магнитопровода

## Литература

1. *Сливинская А.Г.* Электромагниты и постоянные магниты. Учебное пособие для студентов вузов. М., Энергия, 1972.
2. *Ю.С.Русин.* Расчет электромагнитных систем. Энергия. Ленинградское отделение. 1968.
3. *Сергеев В.Т., Шихин А.Я.* Магнитоизмерительные приборы и установки. М., Энергоиздат, 1982.
4. *Панин В.В.* и др. Измерение импульсных магнитных полей. Энергоатомиздат. 1987.
5. *Сергеев В.Г.* и др. Магнитоизмерительные приборы и установки. Энергоиздат, 1982
6. *Любчик М.А.* Оптимальное проектирование силовых электромагнитных механизмов. М., Энергия, 1974
7. *Бэркг.* Справочное пособие по магнитным явлениям.. Энергоатомиздат. 1991
8. *Козлов Г.Д.* Коммутация магнитного потока. М., Энергия, 1974
9. *Миловзоров В.П.* Электромагнитная техника. Энергия. Ленинградское отделение. 1964.
10. *Сидоров И.Н.* и др. Малогабаритные магнитопроводы и сердечники: Справочник. М., Радио и связь. 1989.
11. *Рабкин Л.И., Новиков З.И.* Катушки индуктивности на ферритовых сердечниках. Л., Энергия, 1972.
12. ГОСТ 18311—80. Изделия электротехнические. Термины и определения.
13. ГОСТ 23618—79. Изделия из ферритов и магнитодиэлектриков. Термины и определения.
14. *Белопольский Н. И., Каретникова Е. И., Пикалова Л. Г.* Расчет трансформаторов и дросселей малой мощности.—М.: Энергия, 1973.—272 с.
15. *Злобин В. А., Муромкина Т. С, Поспелов П. В.* Изделия из ферритов и магнитодиэлектриков.—М.: Сов. радио, 1972.—240 с.
16. Аморфные прецизионные сплавы (образная информация) / Б. В. Молотилов, А. Ф. Прокошин, Н. М. Давыдова, Г. И. Николаева.— М.: Черметинформация. Сер. Металловедение и термическая обработка.—1981.—Вып. 2.—15-18 с.
17. *Преображенский А. А., Бишард Е. Г.* Магнитные материалы и элементы.—М.: Высшая школа, 1986.—352 с.
18. *Касаткин А.С.* Основы электротехники: Учебное пособие для сред. ПТУ. М.: Высшая школа, 1986 г.
19. *Альтман А.Б.* и др, Постоянные магниты. Справочник. Под. ред. *Ю.М. Пятина.* М., Энергия, 1971.
20. *Хек К.* Магнитные материалы и их техническое применение. Пер. с нем. М., Энергия, 1973.

21. *Холодов Ю.А.* Мозг в электромагнитных полях. М: Наука, 1982. - 123с.
22. Системы комплексной электромагнитотерапии / под ред. *А.М. Беркутова* и др. — М.: Лаборатория базовых знаний, 2000. — 376 с.
23. *В.С. Улащик.* Магнитотерапия: состояние проблемы, перспективы развития// "Низкочастотная магнитотерапия", мат. Международной научно-практической конференции "Применение магнитных полей в медицине", 25-26 октября 2001 г., г. Оренбург/ Под ред проф. *В.С. Улащика.* — Минск: Белорусский центр научно-медицинской информации, 2001. — 173 с.:табл., ил.
24. *В. Ф. Бинги, А.В. Савин* Физические проблемы действия слабых магнитных полей на биологические системы // Успехи физических наук. -- Т. 173, N3. —с.265-300.
25. *Бучаченко А.Л., Сагдеев Р.З., Салихов К.М.* Магнитные и спиновые эффекты в химических реакциях. — Новосибирск: Наука, 1978. — 296 с.
26. *Волобуев А.Н., Жуков Б.Н., Овчинников Е.Л., Труфанов Л.А.* Спиновые механизмы влияния постоянного магнитного поля на перенос нервного импульса // Магнитология. — 1993. — N 1 — с.7-11.
27. *Г.Е. Григорян.* Са<sup>2+</sup>-гидратационная теория и механизмы действия магнитных полей на поведение // Проблемы электромагнитной безопасности человека., М.,1996 г., сс. 20-21.
28. *Г.Е. Григорян.* Магниторецепция и механизмы действия магнитных полей на биосистемы // UNESCO, BIOMEDICA, Ереван, 1999, — 79 с.
29. *Кисловский Л.Д.* О возможном молекулярном механизме влияния солнечной активности на процессы биосферы // Влияние солнечной активности на атмосферу и биосферу Земли. — М.: Наука, 1971. — с.260.
30. *Кисловский Л.Д.* О роли критических явлений при фазовых переходах второго порядка в процессе самоорганизации неравновесных систем биосферы // Проблемы космической биологии. — 1988. — Вып.55. — С. 121-128.
31. *Березин М.В., Ляпин Р.Р., Салецкий Ф.М.* Влияние слабых переменных магнитных полей на рассеяние света водными структурами (препринт /МГУ.Физ.фак., N 21). — М.: 1988. — 41 с.
32. Реакции биологических систем на магнитные поля. — М.:Наука, 1978. -216с.
33. *Демецкий А.М., Хулуп Г.Я., Цецохо А.В.* Медицинская магнитология — возможности и перспективы // Биологическое и лечебное действие магнитных полей: Матер, междунар. научн.- практ. конф., г.Витебск, 1999 г. — Витебск, 1999.- с. 21—25.
34. *Пресман А.С.* Электромагнитные поля и живая природа. М.:Наука.- 1968 г. — 288 с.
35. *Osterman K S, Hoopes P J, DeLorenzo C, Gladstone D J and Paulsen K D.* 2004. Non-invasive assessment of radiation injury with electrical impedance spectroscopy. Phys. Med. Biol. 49 665—683.
36. *Foster K R and Schwan H P* 1989 Dielectric properties of tissues and biological materials: a critical review Crit. Rev.Biomed. Eng. 17 25—104.

37. *Schwan H.P.* 1957. *Advances in Bio. And Med. Physics*, V, 147.
38. *Fricke H.* 1925. *J. Gen. Physiol*, 9, 137.
39. *Cole K.S.* 1968. *Membranes, Ions and Impulses*, University of California Press, Berkeley/LA.
40. *Cole K. S. and Cole R. #..* 1941. *J. Chem. Phys.*, 9, 341.
41. *Albert S.N.* 1971. *Blood volume and extracellular fluid volume*. Springfield, Illinois: Charles and Thomas Publisher, 290 p.
42. *Gagnon R.T., Gagner M., Duplessis S.* 1994. Variations of body comparison by bioelectric impedancemetry after major surgery // *Ann. Chir.* V. 48 p.708-716.
43. *Kong C.H., Thompson C.M., Lewis C.A., et al.* 1993. Determination of total body water in uraemic patients by bioelectrical impedance // *Nephrol. Dial. Transplant.* V. 8 p.716-719.
44. *Kreymann G., Paplow N., Muller C. et al.* 1995. Relation of total body reactance to resistance as a predictor of mortality in septic patients // *Crit. Care Med.* V. 23 (Suppl.) p. A49.
45. *Patel R., Peterson E., Silverman N., et al.* 1996. Estimation of total body and extracellular water in post-coronary artery bypass graft surgical patients using single and multiple frequency bioimpedance.// *Crit. Care Med.* V. 24 p. 1820-1828.
46. *Chang I.A.* 1998. Dielectric properties of healthy and chronically infarcted myocardium PhD Thesis Department of Bioengineering, University of Pennsylvania, Philadelphia, PA.
47. *Buono M.J, Burke S, Endemann S, Graham H, Gressard C, Griswold L and Michalewicz B.* 2004. The effect of ambient air temperature on whole-body bioelectrical impedance. *Physiol. Meas.* 25 119—123.

# ОГЛАВЛЕНИЕ

|                                                                          |                |
|--------------------------------------------------------------------------|----------------|
| <b>ГЛАВА 1. ИСТОРИЯ МАГНЕТИЗМА</b>                                       | <b>7</b>       |
| Геркулесов камень                                                        | 7              |
| Рукотворные магниты                                                      | 14             |
| Гильберт разъединяет                                                     | 19             |
| Эрстед объединяет                                                        | 31             |
| Железо обзаводится "помощником"                                          | 37             |
| Биттер: "секрет-- в охлаждении"                                          | 53             |
| Оннес: "дальше охлаждать некуда!"                                        | 57             |
| Сортировщики микрочастиц                                                 | 86             |
| Электронный парамагнитный резонанс                                       | 91             |
| Пирамиды ядерного века                                                   | 92             |
| Плазма в магнитной рубашке                                               | 114            |
| К энергетике XXI века                                                    | 124            |
| <br><b>ГЛАВА 2. ОСНОВЫ ТЕОРИИ МАГНИТНОГО ПОЛЯ</b>                        | <br><b>137</b> |
| 2.1. Магнитное взаимодействие токов                                      | 137            |
| 2.2. Закон Био-Савара. Теорема о циркуляции                              | 144            |
| 2.3. Сила Лоренца                                                        | 151            |
| 2.4. Магнитное поле в веществе                                           | 159            |
| 2.5. Электромагнитная индукция. Правило Ленца                            | 164            |
| 2.6. Самоиндукция. Энергия магнитного поля                               | 171            |
| <br><b>ГЛАВА 3. ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ И МЕТОДЫ ПОЛУЧЕНИЯ МАГНИТНОГО ПОЛЯ</b> | <br><b>175</b> |
| Введение                                                                 | 175            |
| 3.1. Электромагниты                                                      | 176            |
| 3.2. Соленоиды                                                           | 178            |
| 3.3. Импульсные магнитные поля                                           | 182            |
| 3.4. Сжатие магнитного потока                                            | 184            |
| 3.5. Магнитное поле Земли                                                | 189            |
| <br><b>ГЛАВА 4. МАГНИТЫ И МАГНИТНЫЕ СВОЙСТВА ВЕЩЕСТВА</b>                | <br><b>202</b> |
| 4.1. Магнитные полюса и магнитное поле                                   | 202            |
| 4.2. Намагничивающая сила и напряженность магнитного поля                | 203            |
| 4.3. Магнитная проницаемость и ее роль в магнетизме                      | 205            |
| 4.4. Теории магнетизма                                                   | 207            |
| 4.5. Магнитные свойства вещества                                         | 213            |
| 4.5.1. Измерение магнитных свойств                                       | 214            |



|                                                                                                                         |     |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 4.5.2. Расчет магнитных свойств . . . . .                                                                               | 216 |
| 4.6. Доменные свойства магнитов . . . . .                                                                               | 218 |
| 4.7. Магнетохимия . . . . .                                                                                             | 231 |
| 4.8. Акустомагнитоэлектрический эффект . . . . .                                                                        | 245 |
| 4.9. Магнитная анизотропия и магнитострикция . . . . .                                                                  | 246 |
| 4.9.1. Анизотропия ферромагнетиков . . . . .                                                                            | 246 |
| 4.9.2. Спонтанная магнитострикция и ее вклад в магнитную<br>анизотропию . . . . .                                       | 248 |
| 4.9.3. Физическая природа естественной магнитной анизотропии . . . .                                                    | 253 |
| 4.9.4. Магнитострикция при техническом намагничивании . . . . .                                                         | 256 |
| 4.9.5. Метод измерений и описание установки . . . . .                                                                   | 257 |
| 4.10. Методы расчета деталей постоянных магнитов . . . . .                                                              | 259 |
| 4.11. Методика расчёта магнитного поля и вихревых токов<br>в проводящих средах при изменении тока в соленоиде . . . . . | 269 |

## **ГЛАВА 5. ПЕРСПЕКТИВНЫЕ МАТЕРИАЛЫ**

|                                                                                                            |            |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| <b>ДЛЯ ПОСТОЯННЫХ МАГНИТОВ . . . . .</b>                                                                   | <b>286</b> |
| Введение . . . . .                                                                                         | 286        |
| 5.1. Необходимые условия для возникновения упорядоченных магнит-<br>ных структур в твердых телах . . . . . | 286        |
| 5.2. Ферромагнитное упорядочение . . . . .                                                                 | 289        |
| 5.3. Ферримагнитное упорядочение . . . . .                                                                 | 293        |
| 5.4. Спиральные и периодические магнитные структуры . . . . .                                              | 295        |
| 5.5. Сперомагнетизм . . . . .                                                                              | 297        |
| 5.6. Асперомагнитная структура . . . . .                                                                   | 298        |
| 5.7. Сперимагнитная структура . . . . .                                                                    | 299        |
| 5.8. Аморфные магнетики . . . . .                                                                          | 300        |
| 5.9. Современное состояние производства магнитных материалов . . .                                         | 303        |
| 5.9.1. Краткая историческая справка . . . . .                                                              | 303        |
| 5.9.2. Получение спеченных магнитов <i>Nd-Fe-B</i> . . . . .                                               | 305        |
| 5.9.3. Перспективы развития современных магнитных технологий<br>в России . . . . .                         | 307        |
| 5.10. Редкоземельные постоянные магниты . . . . .                                                          | 308        |
| 5.11. Получение и применение полимерных магнитов . . . . .                                                 | 310        |

## **ГЛАВА 6. ПРИМЕНЕНИЯ МАГНИТОВ И МАГНИТНОГО ПОЛЯ В ТЕХНИКЕ И ТЕХНОЛОГИЯХ . . . . .**

|                                                                 |     |
|-----------------------------------------------------------------|-----|
| 6.1. Выбор магнита для применения. . . . .                      | 323 |
| 6.2. Применение постоянных магнитов. . . . .                    | 329 |
| 6.3. Магнитные сепараторы. . . . .                              | 334 |
| 6.3.1. Барабанные сепараторы. . . . .                           | 336 |
| 6.3.2. Плоские магнитные сепараторы. . . . .                    | 340 |
| 6.3.3. Магнитные сепараторы из системы выдвижных решеток. . . . | 341 |

|                                                                                          |     |
|------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 6.3.4. Основные разновидности комплексных магнитных сепарационных систем. . . . .        | 342 |
| 6.3.5. Магнитные сепараторы научно-производственной фирмы "ЭРГА" . . . . .               | 347 |
| 6.4. Применение магнитов в рекламном деле. . . . .                                       | 373 |
| 6.5. Использование магнитов в стройиндустрии. . . . .                                    | 379 |
| 6.6. Магнитное охлаждение. . . . .                                                       | 380 |
| 6.7. Применение магнитов типа <i>Nd-Fe-B</i> в электровакуумном приборостроении. . . . . | 387 |
| 6.8. Процессы перемагничивания и методы записи информации на магнитных пленках. . . . .  | 395 |
| 6.8.1. Процессы перемагничивания тонких ферромагнитных пленок . . . . .                  | 395 |
| 6.8.2. Магнитная запись информации. . . . .                                              | 401 |
| 6.8.3. Принцип магнитной записи. . . . .                                                 | 402 |
| 6.8.4. Воспроизведение информации. . . . .                                               | 404 |
| 6.8.5. Магнитные диски. . . . .                                                          | 404 |
| 6.8.7. Термомагнитный метод записи информации. . . . .                                   | 405 |
| 6.9. Применение магнита на транспорте. . . . .                                           | 407 |
| 6.10. Применение магнитного поля в георазведке. . . . .                                  | 433 |
| 6.10.1. Основы теории геомагнитного поля и магниторазведки. . . . .                      | 434 |
| 6.10.2. Аппаратура и методика магниторазведки. . . . .                                   | 452 |
| 6.10.3. Интерпретация и задачи, решаемые магниторазведкой. . . . .                       | 458 |

## **ГЛАВА 7. МАГНИТНЫЕ МЕТОДЫ И СРЕДСТВА НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ И ДИАГНОСТИКИ МАТЕРИАЛОВ, ИЗДЕЛИЙ И КОНСТРУКЦИЙ . . . . . 470**

|                                                                                                        |     |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 7.1. Физические основы магнитных методов. . . . .                                                      | 470 |
| 7.2. Методы неразрушающего контроля и диагностики трубопроводов на основе эффекта Баркгаузена. . . . . | 474 |
| 7.3. Метод Магнитной Памяти Металла . . . . .                                                          | 476 |
| 7.4. Диагностика энергетических объектов. . . . .                                                      | 481 |
| 7.4.1. Диагностика трубопроводов. . . . .                                                              | 481 |
| 7.4.2. Экспресс-метод контроля сосудов и аппаратов. . . . .                                            | 484 |
| 7.4.3. Диагностика труб и поверхностей нагрева энергетических и водогрейных котлов. . . . .            | 485 |
| 7.4.4. Диагностика гибов котельных и паропроводных труб. . . . .                                       | 487 |
| 7.4.5. Экспресс-метод неразрушающего контроля качества сварных соединений. . . . .                     | 490 |
| 7.4.6. Контроль качества технологий восстановления, наплавки, напыления. . . . .                       | 493 |
| 7.5. Приборы и технические средства метода магнитной памяти металла. . . . .                           | 494 |
| 7.6. Методы магнитопорошковой дефектоскопии. . . . .                                                   | 503 |
| 7.7. Методы магнитокристаллической анизотропии. . . . .                                                | 504 |

|                                                                                                          |     |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 7.8. Магнитный интроскоп для контроля трубопроводов в процессе эксплуатации без вскрытия грунта. . . . . | 506 |
| 7.9. Приборы и технические средства магнитных методов. . . . .                                           | 511 |

## **ГЛАВА 8. ПРИМЕНЕНИЕ МАГНИТОВ И МАГНИТНОГО ПОЛЯ В СОВРЕМЕННОЙ МЕДИЦИНЕ. . . . .**

|                                                                                                                                   |            |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| <b>8.1. Введение и краткая историческая справка. . . . .</b>                                                                      | <b>522</b> |
| 8.2. Биофизические и биохимические основы магнитотерапии. . . . .                                                                 | 523        |
| 8.2.1. Механизмы физиологического и терапевтического действия . . .                                                               | 524        |
| 8.2.2. Показания к лечебному применению магнитных полей. . . . .                                                                  | 528        |
| 8.2.3. Противопоказания. . . . .                                                                                                  | 530        |
| 8.2.4. Магнитные поля биологического происхождения и их использова-<br>ние в медицине. . . . .                                    | 530        |
| 8.2.5. Магнитная терапия сегодня. . . . .                                                                                         | 542        |
| 8.2.6. Магнитно-резонансная томография. . . . .                                                                                   | 544        |
| 8.2.7. Магнитная стимуляция — помощь при лечении психических<br>расстройств. . . . .                                              | 545        |
| 8.2.8. Обзор применения магнитов в медицине. . . . .                                                                              | 546        |
| 8.3. Низкочастотная магнитотерапия с использованием аппаратов серии<br>"СпОк" в клинической и восстановительной медицине. . . . . | 555        |
| 8.3.1. Механизмы биологического действия магнитных полей. . . . .                                                                 | 555        |
| 8.3.2. Клиническое применение аппаратов "СПОК". . . . .                                                                           | 560        |
| 8.3.3. Аутогемоманнитотерапия в клинической практике. . . . .                                                                     | 565        |
| 8.4. Импедансный метод контроля биофизического воздействия магнит-<br>ного поля на живые ткани. . . . .                           | 570        |
| 8.4.1. Общие положения. . . . .                                                                                                   | 570        |
| 8.4.2. Применение биоимпедансных методов в медицине. . . . .                                                                      | 571        |
| 8.4.3. Биофизические основы измерения импеданса живых тканей . . .                                                                | 571        |
| 8.4.4. Технические особенности измерения биоимпеданса. . . . .                                                                    | 580        |
| 8.5. Применение магнитно-резонансной томографии. . . . .                                                                          | 581        |
| 8.6. Методы расчета магнитных индукторов. . . . .                                                                                 | 595        |
| 8.6.1. Расчет магнитной цепи и экспериментальное исследование<br>характеристик электромагнитных дросселей индуктора. . . . .      | 595        |
| 8.6.2. Величина магнитного поля постоянного магнита в зависимости<br>от удаленности от магнитопровода. . . . .                    | 596        |
| 8.6.3. Определение намагничивающей силы и параметров обмотки . . .                                                                | 597        |
| 8.6.4. Поле в пространстве. . . . .                                                                                               | 602        |
| 8.6.5. Индуктор "Манжетка". . . . .                                                                                               | 604        |
| 8.6.6. Индуктор модели "Стимулирующий мат". . . . .                                                                               | 608        |
| 8.6.7. Магнитная индукция излучателя типа "Чашка". . . . .                                                                        | 609        |
| 8.7. Исследование зависимости магнитной индукции от расстояния<br>между подвижными магнитопроводами. . . . .                      | 613        |

**Плетнев Сергей Владимирович**

**МАГНИТНОЕ ПОЛЕ, СВОЙСТВА, ПРИМЕНЕНИЕ:**

Научное и учебно-методическое справочное пособие

ЛР №065701 от 3 марта 1998 г. Научное издательство биографической  
международной энциклопедии "Гуманистика"

Сдано в набор 2.05.2004 г. Подписано к печати 30.06.2004 г. Формат 70х100 1/16.  
Бумага офсетная. Гарнитура "Таймс". Печать офсетная. Печ. л. 39,0. Уч.-изд. л. 41,0.  
Тираж 2000. Заказ № 774 . Цена договорная.

191 186, Санкт-Петербург, а/я 49.

Научное издательство биографической международной энциклопедии "Гуманистика".

**Интернет [www.humanistica.ru](http://www.humanistica.ru) Электронная почта [meloua@humanistica.ru](mailto:meloua@humanistica.ru)**

Отпечатано с готовых диапозитивов

В ОАО "Техническая книга"

190005, Санкт-Петербург, Измайловский пр., 29.