



МИР
ЗАНИМАТЕЛЬНОЙ
НАУКИ

Э.Т. Брук-Левинсон
В.Е. Фертман

«ЁЖ» В СТАКАНЕ

N



S

«ЁЖ» В СТАКАНЕ



МИР
ЗАНИМАТЕЛЬНОЙ
НАУКИ

Э.Т. Брук-Левинсон
В.Е. Фертман

«ЁЖ»
В СТАКАНЕ
МАГНИТНЫЕ МАТЕРИАЛЫ:
ОТ ТВЕРДОГО ТЕЛА
К ЖИДКОСТИ

2-е издание,
переработанное и дополненное

Минск
«Вышэйшая школа»
1991



Scan AAW

ББК 22.334
Б89
УДК 537.6

Серия основана в 1982 г.

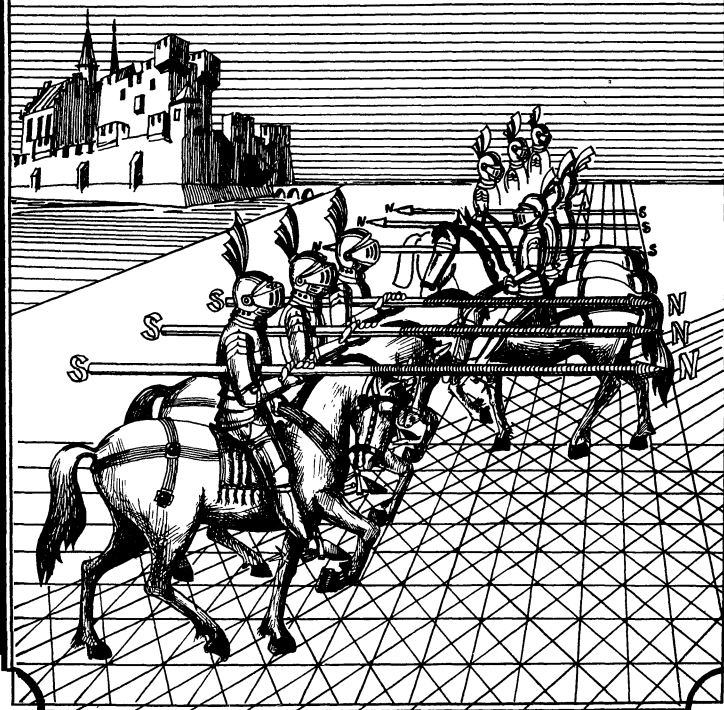
Рецензент — доктор технических наук, профессор *В. С. Зарубин*

1604050000—061
Б ————— 102—91
М 304(03)—91

ISBN 3-339-00588-7

© Издательство «Вышэйшая школа», 1983
© Э. Т. Брук-Левинсон,
В. Е. Фертман,
изменения и дополнения, 1991

МАГНИТЫ КАК МАГНИТЫ



ИЗ ГЛУБИНЫ ВЕКОВ

Вся история магнита и магнетизма связана с тайнами. Ничем не примечательный с виду камень притягивал железо. Почему? Нельзя сказать, чтобы люди не пытались ответить на этот вопрос. Напротив, ответов было более чем достаточно. Считалось, что магнитный железняк, который в природном виде обладает магнитными свойствами, имеет душу. Такое предположение не должно казаться смешным, если встать на точку зрения древних, видевших следствие — железо действительно притягивалось без всякой видимой причины. Имелись и другие точки зрения. Диоген из Аполлонии (не тот, который сидел в бочке), живший около 460 г. до н. э., полагал, что в железе есть влага, которая питает «сухость» магнита. Влага, стало быть, должна «перетекать» из железа в магнит. Вариации на тему «влага — сухость», исходившие от столь крупных мыслителей древности, как Эмпедокл, Эпикур и Демокрит, основывались на том, что должно существовать «нечто», связывающее магнит и железо. Это «нечто» получало разные имена, но во всех ипостасях оно «испарялось», «перетекало», «переходило» от железа к магниту, оставаясь невидимым и осуществляя ту связь, для объяснения которой оно и было придумано.

Вот что говорит римский поэт и философ Лукреций в своей знаменитой книге «О природе вещей»:

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...

И далее:

Также бывает порой, что железо отходит от камня
Этого, то возвращаясь к нему, то опять убегая.

Две последние строки прямо указывают на существование магнитных полюсов, о которых — увы! — не догадывается ни Лукреций, ни Платон, заметивший способность магнита не только притягивать железо, но и отталкивать его.

Магнит и сегодня поражает воображение неискушенного человека.

«Чудо ... Я приобщился к нему ребенком четырех или пяти лет, когда мой отец показал мне компас. То, что игла вела себя столь определенным образом, совершенно не соответствовало неосознанному миру моих представлений (там действия были связаны только с непосредственным «прикосновением»). Я все еще помню (а может, мне кажется, что я помню) — это событие произвело на меня неизгладимое впечатление». Эти слова Эйнштейна из его автобиографии ярко описывают впечатление, производимое компасом на человека, впервые познакомившегося с его действием.

Именно компас стал первым практически применением магнита в деятельности человека. За приоритет этого изобретения идет борьба не меньшая, чем за право считаться родиной Гомера. Одни считают местом рождения компаса Китай около III—II тысячелетия до н. э. По другим данным, компас — изобретение итальянцев или арабов, а в Китай он попал лишь в XIII в. н. э. Так или иначе с XII в. компас известен в Европе.

Догадка древних о существовании неизвестного «вещества», субстанции, ответственной за взаимодействие магнита и железа и называемой Диогеном «су-

хостью — влагой», а Лукрецием «семенами», или же «током», вовсе не безосновательна, и их попытки объяснить явление магнетизма потерпели неудачу совсем не потому, что им не хватало изобретательности (это качество как раз имелось у них в избытке). Причиной неудачи явился недостаток, присущий всей (или, вернее, почти всей) античной науке. В древние времена никому не приходило в голову, что все выдвигаемые относительно тех или иных природных явлений утверждения следует подвергать экспериментальной проверке. Достаточно было бы отделить железо от магнита влагонепроницаемой перегородкой, чтобы убедиться в несостоятельности концепции Диогена о питании «сухости» магнита «влагой» железа. Подобный эксперимент мог выявить и отсутствие каких-либо «семян», но методология древней науки не требовала доказательств. Правильность рассуждений ценилась выше очевидности фактов, а эксперимент как критерий истины отсутствовал. Такой способ познания получил название *метафизического*. Он был целиком унаследован учеными средних веков и фактически не имел ничего общего с подлинно научным познанием.

Бреши в «стене» метафизики были пробиты учеными, имена которых по сей день чтутся человечеством. Галилео Галилей одним из первых осознал необходимость экспериментальной проверки рассуждений и не только осознал, но и осуществил ее. До Галилея господствовало мнение древнегреческого философа Аристотеля — непререкаемого авторитета Средневековья, утверждавшего, что более тяжелые предметы падают на Землю быстрее. Галилей прямыми наблюдениями установил, что скорость падения не зависит от массы, но пропорциональна одной и той же величине для тел разной массы. Менее известна деятельность английского ученого XVI в. — Уильяма Гильберта (не путать

со знаменитым математиком нашего столетия — Давидом Гильбертом!). Врач по профессии, он сделал блестящую карьеру и стал лейб-медиком королевы Елизаветы и президентом Королевского медицинского общества. Наряду с врачеванием у Гильберта было еще одно занятие, которое он рассматривал как не менее важное, — изучение магнита. Под словом «изучение» он имел в виду не рассуждение о магнитных свойствах, а самое настоящее экспериментальное исследование.

За триста лет до Гильберта Пьер Перегрин де Марикур уже проводил эксперименты с шарообразным магнитом, названным им *тереллой*. Он обнаружил, что железный брусок, приставленный к этому магнитному шару, ориентируется определенным образом. Оказалось, что линии, вдоль которых располагался брусок, сходятся в двух точках. Эти точки он назвал *полюсами* магнита. Гильберт повторил эти эксперименты, но пошел дальше де Марикура: он понял, что существует глубокая аналогия между тереллой и Землей и что Земля также является магнитом! Таким образом, таинственное постоянство магнитной стрелки получило, наконец, объяснение. Собственные результаты и сведения, почерпнутые им у других исследователей, Гильберт изложил в книге, вышедшей в 1600 г. (есть перевод на русский язык: *Гильберт В. О магните, магнитных телах и о большом магните — Земле*. М.: Изд-во АН СССР, 1956). Книга Гильберта произвела переворот во взглядах на свойства магнита. Раньше верили, что «лук и чеснок уничтожают действие магнита», по причине чего рулевым на судах категорически запрещалось употреблять их в пищу (это не мешало им, впрочем, нарушать запрет), что близость бриллианта вызывает утрату магнитных свойств. Подобные суеверия были высмеяны Гильбертом, ибо не выдерживали

проверки опытом. Однако, высмеивая суеверия, Гильберт сам дает объяснение магнетизму, не вписывающееся в научные рамки: он, как и древние, полагал все же, что у магнита есть ... душа. Поскольку она есть у Земли, говорил Гильберт, должна она быть и у магнитного железняка, ведь он «является частью и любимейшим плодом своей живой матери Земли».

Французский ученый Рене Декарт, родившийся в 1596 г., за семь лет до смерти Гильберта, погибшего во время эпидемии чумы, был знаком с его трудами и признавал идею Гильберта о магнетизме Земли. Веривший в торжество разума и в его безграничные возможности, Декарт не обошел своим вниманием и магнетизм. Не будучи связанным с какими-либо экспериментальными исследованиями, Декарт тем не менее предложил свое объяснение магнитных свойств, которому нельзя отказать в остроумии. Хотя Гильберт уже убедительно доказал несостоятельность теории испарения («влага — сухость»), Декарт высказал предположение, что невидимое вещество, субстанция, соединяющая магнит и железо, все-таки существует; разумеется, это не какие-нибудь капли или жидкость, субстанция имеет форму винтиков. Эти винтики «провинчиваются» сквозь Землю, входя в один полюс и выходя из другого, и поскольку есть два полюса, есть и два рода винтиков, движущихся во встречных направлениях. Конечно, по выходе из полюса винтики вынуждены двигаться по воздуху, что нельзя считать их любимым занятием. И если на их пути попадается магнит, они предпочитают остаться в магните, «провинчиваясь» сквозь него снова и снова. Причина в том, что магнитный железняк, железо и сталь в отличие от других материалов имеют внутри резьбу, по которой винтикам удобно двигаться. Резьба эта земного происхождения: ведь все магниты добываются из недр Земли.

Железо само по себе не является магнитом потому, что оно мягкое и при добыче резьба разрушается. Трудно поверить, но рассуждения Декарта пользовались большим успехом, объясняемым отчасти тем высоким авторитетом, которым пользовался Декарт среди своих современников, отчасти отсутствием иной, сколько-нибудь удовлетворительной теории.

Весь XVII в. и половина следующего не внесли в понимание магнетизма ничего нового, и, как это часто бывает в науке, прогресс в объяснении магнитных явлений пришел с другой стороны.

Вне зависимости от изучения магнетизма развивались исследования электричества. Если теория, основанная на «влажности» и «сухости» магнита, успеха не имела, то электрическая жидкость быстро завоевала многочисленных сторонников. Бенджамин Франклин трактовал электрический заряд как недостаток или утечку этой жидкости (флюида). В 1733 г. управляющий французским Королевским ботаническим садом Ш.-Ф. де Фай установил существование двух видов электричества, которые он назвал «резиновым» и «стеклянным». Таким образом, электричество представлялось как бы смесью двух разных жидкостей. Не так ли обстоит дело с магнетизмом? Шведский ученый Джоан Вилке и голландский исследователь Антон Бругманс выдвинули такое предположение независимо друг от друга в 1778 г. Их идея получила широкое распространение. Спустя семь лет Шарль Кулон поставил эксперимент, в котором установил, что мельчайшие капельки гипотетических электрической или магнитной жидкостей притягиваются (разноименные) или отталкиваются (одноименные) с силой, обратно пропорциональной квадрату расстояния между ними. Теперь это утверждение известно как закон Кулона. Почему же электрическая жидкость может перетекать от одно-

го тела к другому, а магнитная — нет? Кулон ответил и на этот вопрос. Магнитные жидкости, утверждал он, не независимы друг от друга. В отличие от электрических жидкостей они связаны с мельчайшими частицами вещества — молекулами, как мы сказали бы сегодня. Последнее служит также объяснением существования у магнита двух полюсов. Более глубокое толкование во времена Кулона едва ли было возможно, ведь представления об атомной структуре вещества еще не существовало. Однако аналогия между электричеством и магнетизмом носила в это время чисто внешний характер. Никто не предполагал, что они как-то связаны.

Рубеж XVIII и XIX столетий стал переломным для исследований электричества и магнетизма: в 1800 г. появилась гальваническая батарея. Надежный источник электрического тока и стал тем отправным пунктом, исходя из которого ученые начали распутывать клубок, образовавшийся сплетением идей и фактов, относящихся к магниту. Через 20 лет после изобретения гальванической батареи датчанин Ханс Кристиан Эрстед обнаружил, что электрический ток вызывает движение свободно подвешенной иглы. Движение иглы шло вразрез со всеми представлениями об электрических и магнитных жидкостях и прямо указывало на существование связи между электричеством и магнетизмом. Появилось новое слово — *электромагнетизм*. Два старых термина объединились, чтобы больше уже не расставаться. Статья («мемуар») Эрстеда с описанием эксперимента произвела огромное впечатление на современников. Дальнейшие события разворачивались драматически и стремительно, как в кино, которого, правда, тогда еще не существовало.

Французский физик Доминик Франсуа Араго, доложивший на заседании Академии об опыте Эрстеда,

провел самостоятельные эксперименты. Он обнаружил, что действие тока аналогично действию обычного магнита: железные опилки притягивались, иглы намагничивались.

Его коллега Андре Мари Ампер, в честь которого названа единица силы электрического тока, предположил, что причиной магнетизма железа служат токи, проходящие внутри магнита перпендикулярно к его оси. Он же обнаружил, что петля, образованная проводником с током, ведет себя как элементарный магнит.

Новые открытия и факты сыпались, как из рога изобилия, в них не было недостатка. Чего действительно не хватало — это новой концепции, которая позволила бы свести многочисленные факты воедино, интерпретировать их с одной точки зрения.

Начала новой теории, однако, были заложены еще в XVII веке, не написавшим за всю свою жизнь ни одной формулы. Искусный экспериментатор, полагавшийся не на сложную аппаратуру, но на выдумку и изобретательность, английский физик Майкл Фарадей выдвинул совершенно новую концепцию, которой суждено было занять господствующее место в большинстве будущих физических теорий. Мифические ненаблюдаемые жидкости, «втекавшие» в магниты и «вытекавшие» из них, были заменены Фарадеем новым понятием — *поле*, которое, по мнению Фарадея, и осуществляло взаимодействие магнитных материалов. Фарадей рассматривал поле как совершенно реальный физический объект. Он ввел также понятие о силовых линиях, которые придавали полям определенную наглядность.

Появление поля кардинально изменяло взгляды на природу взаимодействий как электрических, так и магнитных. Действие на расстоянии, дальное действие, всегда носившее несколько ирреальный, мифический

характер, стало ненужным. Поле стало материальным объектом, осуществляющим конкретное воздействие одного тела на другое.

Фарадей не только ввел новую концепцию, но и совершил фундаментальное открытие, и по сегодняшний день определяющее облик всей земной технологии: он открыл явление *электромагнитной индукции*.

Идеи Фарадея были подхвачены и развиты его выдающимся соотечественником Джеймсом Клерком Максвеллом. Основываясь на идеях Фарадея (это обстоятельство неоднократно подчеркивалось самим Максвеллом и может служить примером научной честности и добросовестности), Максвелл в своих знаменитых уравнениях дал полную математическую формулировку всех явлений, связанных с электрическими и магнитными полями и их источниками. Можно сказать, что уравнения Максвелла «знают» об электромагнитном поле все: они определяют, какое поле создается током, какой ток создается полем, как в результате изменения магнитного поля возникает электрическое и наоборот, словом, о полях им действительно известно все. Эти уравнения дожили до наших дней и сыграли выдающуюся роль в создании специальной теории относительности Эйнштейна. Уравнения Максвелла великолепно объясняют, как протекают электромагнитные явления. Они, однако, не содержат никаких указаний относительно того, почему эти явления протекают именно таким, а не иным образом. Иначе говоря, на простой вопрос, который задавали еще древние: «почему магнит притягивает железо?», уравнения Максвелла не дают ответа.

Еще Бругманс установил, что не все вещества одинаково ведут себя в присутствии магнита: магнит притягивает кобальт, но отталкивает сурьму и висмут.

Повторяя эксперименты Бругманса и производя

опыты с различными веществами, Фарадей выяснил, что все вещества либо притягиваются, либо отталкиваются магнитом. Пользуясь фарадеевской терминологией, можно сказать, что одни вещества (те, что притягиваются) усиливают поле магнита, а другие (те, что отталкиваются) его ослабляют. «Усилители» поля получили название *парамагнетиков*, «ослабители» — *диамагнетиков*.

Важные наблюдения за изменением магнитных свойств при изменении температуры были проведены Пьером Кюри, который изучал добавочное поле, возникающее при помещении пара- и диамагнетиков в поле магнита. Он выяснил, что это добавочное поле прямо пропорционально полю магнита и может характеризоваться коэффициентом пропорциональности, называемым *магнитной восприимчивостью*, которая положительна для парамагнетиков и отрицательна для диамагнетиков. Оказалось, что парамагнитная восприимчивость убывает с ростом температуры. Иначе говоря, добавка к полю магнита тем меньше, чем сильнее нагрето парамагнитное вещество, помещенное в это поле. Это утверждение носит название *закона Кюри*. Диамагнитная восприимчивость менялась с изменением температуры довольно слабо, все время оставаясь отрицательной.

Среди парамагнетиков выявился особый класс веществ, возглавляемый железом и поэтому получивший название *ферромагнетиков* (от латинского *ferrum* — железо). Выше некоторой температуры, названной *температурой* или *точкой Кюри*, они вели себя как обычные парамагнетики, подчиняясь закону Кюри. Однако ниже точки Кюри величина добавочного поля круто нарастала, превосходя поле магнита во много раз. Увеличивая поле магнита, можно было добиться и увеличения добавочного поля, но лишь до некоторого

предела, выше которого оно уже не увеличивалось. Наступало *насыщение*. Весь этот набор интереснейших фактов не мог не вызвать, разумеется, попыток дать им объяснение.

Некоторую подсказку давали уже опыты Эрстеда и Араго. Действительно, если петля с током ведет себя как магнит, не обусловлены ли свойства магнита какими-то токами? Такое предположение выдвигалось уже Кулоном. Увереннее высказывался Огюстен Жан Френель — французский физик, более известный своими работами по оптике. В письмах, адресованных Амперу, он утверждал, что токи, приводящие к магнетизму, имеют иную природу, чем токи в обычном проводящем кольце: эти токи как-то связаны с атомами или молекулами. Более подробное и ясное толкование должно было бы опираться на конкретные представления о структуре атома. Письмо Френеля датировано 5 июня 1821 г., когда никто еще не представлял, что атом имеет какое-то внутреннее устройство; в полном соответствии со своим названием атом полагался неделимым.

Разного рода догадки относительно природы внутренних токов высказывались в течение столетия, пока французский исследователь Пьер Вейс в 1907 г. не выдвинул предположение, что ферромагнетизм, основной чертой которого является существование самопроизвольной (спонтанной) намагниченности, исчезающей выше точки Кюри, обусловлен *взаимодействием* молекул магнитного вещества. Каково же это взаимодействие? Этого Вейс не знал. Его главное предположение заключалось в том, что результат этого взаимодействия такой же, как если бы отдельная магнитная молекула находилась во внешнем магнитном поле, с тем отличием, что это магнитное поле есть результат воздействия на молекулу со стороны всех остальных молекул веще-

ства. Вейс назвал поле *молекулярным*. Откуда же брать его значение? Подход Вейса не дает полного описания ферромагнетизма. Он содержит параметр, подлежащий определению из сравнения предсказаний теории с результатами экспериментальных измерений.

Теория Вейса позволила «объяснить» основные факты ферромагнетизма: спонтанную намагниченность ниже точки Кюри и ее отсутствие при более высоких температурах. Однако количественная информация, предоставляемая теорией молекулярного поля, оказалась поразительно неточной. Температура Кюри, которая была хорошо известна из экспериментов (1043 К для железа), превосходила значение, предсказываемое полем Вейса в десятки тысяч раз! Такое расхождение могло обескуражить любого, но Вейс твердо стоял на своем. «Я думаю, однако,— писал он в заключение своей статьи,— что теория молекулярного поля объясняет так много фактов, что можно быть уверенным, что она содержит значительную часть истины, а данная трудность должна рассматриваться не как возражение теории, а как стимул для поисков новых идей в теории строения атома».

Причина неудачи теории Вейса была чрезвычайно схожа с той, которая тормозила исследование магнитных явлений в «доэрстедовский» период, когда электричество и магнетизм существовали в умах исследователей независимо друг от друга. Вейс предполагал, что взаимодействие молекул имеет магнитную природу. Он уподоблял молекулы магнитным стрелкам, каждая из которых воздействует на другую своим собственным магнитным полем. Магнитные силы чрезвычайно малы, и основанное на них молекулярное поле оказалось на четыре порядка (в десять тысяч раз) меньше того значения, которое требовалось для удовлетворительного согласия теории Вейса с эксперимен-

том. Истинная причина расхождения заключалась вовсе не в ошибочности идей Вейса (дальнейшее развитие науки показало, что они являются приближенными, но верными), она состояла в том, что в основе молекулярного поля лежали не магнитные, а электрические силы. Снова, как и в опыте Эрстеда, электричество пришло на помощь магнетизму, однако для того, чтобы эта помощь стала эффективной, должен был произойти переворот в физике, в результате которого были выработаны новые взгляды как на строение атома, так и на законы атомного мира.

РАЗЪЯТЫЙ НА ЧАСТИ

Хотя электрон был известен с начала XX в., его роль в атомной структуре долгое время оставалась неясной. Конечно, проще всего было предположить, что электроны входят в состав атомов. Но электроны, как было известно уже тогда, обладают отрицательным зарядом, в то время как атомы нейтральны. Следовательно, отрицательный заряд электронов должен компенсироваться положительным зарядом. Зарядом чего? Конечно, ядра, с уверенностью скажет сегодняшний школьник. Такой уверенности не хватало, однако, величайшим ученым начала века.

Одна из моделей атома выглядела так: электроны плавали в положительно заряженном «желе». Что это за желе, в модели не уточнялось. Тайну положительного заряда удалось открыть английскому физiku Э. Резерфорду. Обстреливая различные вещества альфа-частицами (так называют ядра атома гелия), он обнаружил, что эти частицы отклоняются от первоначального направления на значительные углы, а некоторые из них отлетают назад, как если бы они натолкнулись на внушительное препятствие. Если бы атом

действительно представлял собой электроны, взвешенные в «желе», картина должна была быть совершенно иной — ведь размазанное по всему объему атома «желе» вряд ли посылало бы тяжелые альфа-частицы назад. Резерфорд сделал вывод: положительный заряд атома сосредоточен в центре, причем в этом центре, получившем название «ядра», сосредоточена основная масса атома. «Желе» немедленно удалили из атомной кухни. Атом оказался похожим на привычную планетарную систему: солнце-ядро в центре с вращающимися вокруг него планетами-электронами.

Что следовало из новых представлений об атоме для магнетизма? Ампер утверждал, что причиной магнетизма являются круговые токи внутри магнита. Электрон вращается вокруг ядра. Не есть ли это именно тот «круговой ток», о котором говорил Ампер?

Если рассматривать движение электрона по плоской замкнутой орбите как вращение по кругу вокруг ядра, в результате которого возникает «петля с током», можно рассчитать поле этого тока, или, как его называют еще, *магнитный момент*:

$$M = \frac{i}{c} S,$$

где i — ток в «петле»; c — скорость света; S — площадь, охватываемая контуром, через который проходит ток. Эта площадь равна πr^2 , где r — радиус орбиты. Чтобы продвинуться дальше, нам придется вспомнить некоторые понятия классической механики, относящиеся к вращательному движению. Во-первых, нам понадобится угловая скорость ω , при равномерном движении по окружности равная углу, описываемому радиусом-вектором частицы (вектором, соединяющим центр окружности с частицей) в единицу времени. Обратно пропорциональная угловой скорости величина

$T = 2\pi/\omega$ называется *периодом вращения*. Роль массы во вращательном движении играет момент инерции. Для точки, вращающейся по окружности, он равен произведению массы на квадрат радиуса: $I = mr^2$. Наконец, момент импульса равен произведению момента инерции на угловую скорость: $l = I\omega$.

Теперь можно установить связь между характеристикой механического движения электрона по круговой орбите и магнитным моментом, который возникает в результате этого движения. Заметим, что «ток», бегущий по орбите, равен $i = e/T$, где e — заряд электрона.

Собрав все воедино, выразим магнитный момент электрона через его момент импульса:

$$M = \frac{e}{2mc} l.$$

Этот магнитный момент называется *орбитальным*: ведь он возникает при движении электрона по орбите. Из этого выражения следует такой вывод: отношение магнитного момента к моменту импульса не зависит от орбиты и определяется только универсальными постоянными: массой и зарядом электрона и скоростью света. Дальнейшая проверка подтвердила правильность этого соотношения, что явилось сильным аргументом в пользу планетарной модели. Однако в ней выявился другой недостаток, который не был связан с моделью как таковой. Этот недостаток связан с классической механикой. Было известно, что электрон, движущийся с ускорением, должен излучать электромагнитные волны. Такое излучение неизбежно вело бы к потере энергии, и по прошествии некоторого времени электрон должен был бы упасть на ядро. Движение по окружности — это движение с ускорением, поскольку скорость при этом постоянно меняет направление, а изменение скорости как раз и называется

ускорением. Иначе говоря, планетарная модель должна быть неустойчивой.

Другие указания на несовершенство планетарной модели вытекали из данных, полученных на основе спектроскопических исследований. Изучая спектры света, излучаемые различными веществами, ученые обнаружили, что частоты этого излучения дискретны. Была проделана огромная работа по изучению этих спектров, обнаружена определенная система в расположении спектральных линий, которые так же безошибочно указывали на определенное вещество, как отпечатки пальцев — на определенного человека. И все-таки природа дискретности была непонятна. И в самом деле, если бы электрон излучал энергию, спускаясь с более «высокой» орбиты на более «низкую», а значение ее, пропорциональное частоте света, зависело от разности энергии орбит, то множество электронов во множестве атомов могло бы переходить с самых различных орбит на другие, также отличающиеся друг от друга, и спектр должен был быть непрерывным. Между тем дискретность спектра была несомненной. Дело обстояло так, как если бы электроны могли занимать не любые орбиты, а только определенные.

Выход из создавшегося тупика указал в 1913 г. датский физик Нильс Бор. Он допустил, что в атоме есть орбиты, находясь на которых, электрон не излучает.

Новая и неожиданная идея Бора положила начало *квантовой механике*. Оказалось, что момент импульса электрона в атоме может меняться только определенными порциями — *квантами*. «Стоимость» порции была строго определенной и равнялась величине, называемой *постоянной Планка* и обозначаемой h . Момент импульса определялся выражением $n_i h$, где n_i — целое число. Отсюда следовало, что и орбитальный

магнитный момент электрона может принимать фиксированные значения. Множитель $e/(2mc)$, связывающий два момента и умноженный на величину $\hbar = h/(2\pi)$, получил название *магнетона Бора*: $\mu_B = e\hbar/(2mc)$. Эта величина служит единицей измерения в мире магнитных моментов.

Дальнейшее развитие квантовой механики, связанное с именами Гейзенберга, Шрёдингера, Дирака, Де Бройля, Борна, Френкеля, Фока, Ландау и многих других, полностью перевернуло мир классических представлений. Оказалось, что не имеет смысла говорить о положении частицы в данной точке, а следует рассматривать лишь вероятность ее нахождения в этой точке. Появился *принцип неопределенности*, выдвинутый Гейзенбергом, который утверждал, что нельзя одновременно и сколь угодно точно измерить координату и импульс частицы; ошибки в их измерении — Δx и Δp — связаны соотношением $\Delta x \Delta p \geq \hbar/2$. Соотношение неопределенностей отражало тот факт, что частицы микромира (а к ним, разумеется, относится электрон) чрезвычайно малы по сравнению с приборами, применяемыми для их исследования, и измерение чего бы то ни было, относящегося к частице, оказывает влияние на ее состояние, изменяет его. В результате пришлось отказаться от самого понятия *орбит* в атоме и говорить лишь о некоторых состояниях электронов.

Все новые идеи имели важное значение для понимания природы магнетизма, но особенно значительным оказалось открытие *спина* электрона. Чтобы понять, что это такое, нам придется вернуться к планетарной модели, но не атома, а самой настоящей планетной системы. Орбитальный момент импульса электрона аналогичен моменту импульса Земли при вращении ее по околосолнечной орбите. Как известно, Земля участвует в еще одном вращательном движении: суточном враще-

нии вокруг собственной оси. Этому вращению также соответствует момент импульса, называемый в отличие от орбитального *собственным*. Таким же моментом обладают детский волчок, мяч, закрученный ногой футболиста, словом, все тела, вращающиеся вокруг проходящей через них оси. Нет ли такого же момента у электрона? Сэмюэл Гаудсмит и Джордж Уленбек в 1925 г. показали, что такое предположение позволяет объяснить множество непонятных экспериментальных фактов. Собственный механический момент l_s назвали спином (от английского spin — вращаться, крутиться); он оказался в отличие от орбитального равным $\hbar/2$. Появление двойки в знаменателе сыграло важную роль: спин оказался полужелым. В дальнейшем выяснилось, что частицы с целым и полужелым спинами сильно различаются своими свойствами.

Однако электрон — заряженная частица. Всякое его вращение есть электрический ток. А любой «круговой ток» должен приводить к возникновению магнитного момента. И действительно, электрон обладает собственным, или спиновым, магнитным моментом M_s , причем отношение собственного механического момента к магнитному в два раза больше, чем отношение соответствующих орбитальных моментов:

$$\frac{M_s}{l_s} = \frac{e}{mc}.$$

Так выяснилось, что атом «битком набит» магнитными моментами. Но в математическом отношении магнитные моменты — это всего лишь векторы. Как известно, векторы можно складывать. Выяснилось, что так и следует поступать для того, чтобы узнать, каков магнитный момент всего атома: нужно сложить все орбитальные и все собственные магнитные моменты.

Теперь стало ясно, откуда берутся магнитные мо-

менты атомов, понятна и природа круговых токов Ампера. Правда, в дальнейшем пришлось отказаться от таких наглядных представлений, как вращение электрона вокруг собственной оси, но потеря наглядности — не слишком большая плата за объяснение многовековой тайны магнетизма.

БЕГ ПО КРУГУ

Итак, среди магнитных веществ существуют диамагнетики, как сказано, «ослабители» поля. Какие же вещества попадают в их число? Оказывается, диамагнетизмом обладают практически все вещества, а диамагнитные свойства у многих из них малозаметны по той же причине, по которой шуршание мыши под полом слышно только в ночной тишине: днем его заглушают другие источники звуков — уличный шум, музыка, разговоры. Очень часто роль такого «глушителя» диамагнетизма играет более мощный парамагнетизм (о нем речь впереди). И все-таки есть вещества, которые ведут себя как ярко выраженные диамагнетики. Рассказем сначала о «классических» диамагнетиках, характеризующихся слабыми диамагнитными свойствами.

От чего же зависит, быть веществу диамагнетиком или парамагнетиком? Для ответа на этот вопрос нам придется вернуться к рассмотрению электрона, бегущего по своей орбите в атоме (помня, конечно, об условности понятия самой орбиты).

Как вообще можно узнать, имеет ли данная частица заряд или магнитный момент? Выход только один: поместить эту частицу с зарядом или магнитным моментом во внешнее поле. Какое? Электрическое или магнитное. Тогда возникает вопрос: какое же влияние окажет то или иное поле на заряд или магнитный момент? Поговорим сначала о заряженной частице.

Каким образом можно выяснить, есть у частицы заряд или она, как говорят, электрически нейтральна? Если бы заряженная частица была одна в мире, то выяснить, заряженная она или нет, было бы невозможно. Но вот наличие уже второй заряженной частицы сразу меняет дело: согласно закону Кулона, две заряженные частицы будут притягиваться (разноименные заряды) или отталкиваться (одноименные). Благодаря Фарадею мы понимаем, что одна заряженная частица воздействует на другую посредством электрического поля. Концепция поля позволяет «забыть» о второй частице и рассматривать заряженную частицу во внешнем электрическом поле. Возвращаясь к первоначальному вопросу о характере воздействия внешнего электрического поля на заряженную частицу, заметим здесь (этого достаточно для наших целей), что электрическое поле описывается вектором напряженности \mathbf{E} . В общем случае модуль и направление этого вектора меняются от точки к точке, а совокупность этих переменных значений вектора \mathbf{E} как раз и дает математическое описание электрического поля. Сила воздействия этого поля на частицу с зарядом q задается произведением заряда на вектор напряженности \mathbf{E} , т. е. $\mathbf{F} = q\mathbf{E}$. Значит, куда направлен вектор напряженности электрического поля, туда же направлена и сила, воздействующая на заряд.

А как обстоит дело с взаимодействием заряда и магнитного поля? Здесь ситуация сложнее. Подобно электрическому магнитное поле характеризуется вектором \mathbf{B} , носящим название *вектора магнитной индукции*. Оно также действует на заряженную частицу, но не на любую, а только на движущуюся. И сила этого воздействия определяется выражением

$$\mathbf{F}_\text{л} = q[\mathbf{v} \times \mathbf{B}],$$

где q , как и прежде, — заряд частицы; \mathbf{v} — ее скорость. Из этого выражения ясно, что если скорость частицы равна нулю, то она просто-напросто «не замечает» магнитного поля. Эта сила называется *силой Лоренца*. Знак умножения в выражении для силы Лоренца означает векторное произведение скорости и вектора магнитной индукции. Модуль силы Лоренца

$$F_{\text{Л}} = qvB\sin\alpha,$$

где α — угол между векторами \mathbf{v} и \mathbf{B} . Вы, вероятно, помните правило левой руки, с которым вас знакомил школьный учитель физики. Пользуясь им, легко определить и направление силы Лоренца: если левую руку расположить так, чтобы составляющая вектора магнитной индукции \mathbf{B} , перпендикулярная к вектору скорости заряда, входила в ладонь, а четыре пальца были направлены вдоль вектора скорости движения положительного заряда (для отрицательного наоборот), то отогнутый на 90° большой палец покажет направление действующей на заряд силы Лоренца. Если это правило вас смущает, посмотрите, как определяется векторное произведение, но для дальнейшего нашего рассказа понимать все детали этого правила не обязательно.

Электрон, движущийся по орбите и помещенный во внешнее магнитное поле, также испытывает воздействие силы Лоренца. К чему это приводит? Точное математическое описание влияния поля на электрон в атоме достаточно сложно. Мы здесь заметим только, что сила Лоренца, конечно, не единственная сила, определяющая поведение электрона в атоме, да к тому же и не главная. Помимо нее, на электрон действует сила притяжения со стороны ядра атома: ведь электрон имеет отрицательный заряд, а в ядре находятся *протоны* — частицы, обладающие положительными зарядами. В результате поведение электрона обуславливается влияни-

ем упомянутых двух сил (на самом деле их число еще больше, но другие силы слабее). Собственно говоря, в атоме (за исключением водорода) не один электрон, а несколько, так что правильнее говорить о воздействии поля не на отдельный электрон, а в целом на атом.

Многие из нас играли в детстве с волчком. Волчок — хорошая модель для многих физических систем, и, что важно, модель наглядная. Раскручивая волчок вокруг его оси, вы могли заметить, что не только волчок вращается вокруг собственной оси, но и сама эта ось совершает вращательное движение вокруг некоторой другой оси, воображаемой. При этом волчок, вращаясь, одновременно как бы покачивается. Такое «вторичное» вращение волчка называется *прецессией*. Говорят, что волчок *прецессирует*.

К чему этот разговор о волчке? А к тому, что атом, помещенный в магнитное поле, тоже прецессирует, причем осью, вокруг которой совершается прецессия, является направление вектора напряженности самого магнитного поля. Известна и частота, с которой прецессирует атом. Она определяется выражением

$$\omega_L = \frac{e\hbar}{2m_e c},$$

где e — заряд электрона; m_e — его масса; c — скорость света в вакууме. Индекс L у частоты — это первая буква слова «ларморова», ибо так именно и называется частота прецессии. А сам факт прецессионного движения атома во внешнем магнитном поле составляет содержание *теоремы Лармора*. Смысл ее заключается в том, что магнитный момент атома, связанный с орбитальным движением электрона, начинает вращаться вокруг вектора индукции магнитного поля. Угол же, образованный вектором этого орбитального

магнитного момента с вектором индукции магнитного поля, во время вращения не меняется.

Из теоремы Лармора проистекает важное следствие. Ведь всякое движение электрона — это электрический ток. Прецессионное движение с этой точки зрения не является исключением. Следовательно, прецессия эквивалентна возникновению некоторого электрического тока. Сделаем еще один шаг, следуя за логикой нашего рассуждения. Всякий электрический ток создает магнитный момент, всякий магнитный момент создает магнитное поле. Каково же направление этого дополнительного магнитного поля?

Ответить на этот вопрос нам поможет *правило (или закон) Ленца*. Он гласит, что электрический ток, индуцированный изменением магнитной индукции, порождает магнитный поток, который направлен так, чтобы уменьшить это изменение индукции. Иначе говоря, порождаемое прецессионным движением электрона магнитное поле направлено противоположно тому полю, которое и породило прецессию. Это изменение поддается расчету, который мы здесь, конечно, проводить не будем. Сам факт возникновения в веществе поля, направленного противоположно приложенному извне, называется *диамагнетизмом*, а вещества, у которых такая реакция на внешнее поле единственная, — *диамагнетиками*. Магнитный момент, возникающий в веществе-диамагнетике, пропорционален напряженности внешнего поля: $\mathbf{M} = \chi_d \mathbf{H}$, а величина χ_d называется *диамагнитной восприимчивостью*. Ясно, что по своему смыслу диамагнитная восприимчивость — величина отрицательная. Что же касается ее абсолютных значений, то для большинства веществ они весьма малы. Например, для гелия $\chi_d = -0,2 \cdot 10^{-6}$. Для висмута, который считается сильным диамагнетиком, $\chi_d = -14,5 \cdot 10^{-6}$. Диамагнетизм тем сильнее, чем

больше молекулы вещества. Для таких углеводов, как этан, пропан, бутан и пентан (они расположены в этом перечне в порядке возрастания размеров молекул), порядок диамагнитной восприимчивости по-прежнему 10^{-6} с отрицательными множителями, равными соответственно 66,1; 135,8; 254,1; 429.

Добавив, что диамагнитная восприимчивость не зависит от температуры, можно было бы и закончить этот краткий рассказ о диамагнетизме, если бы не один класс веществ, известный уже в течение девяноста лет, который также можно отнести к диамагнетикам, но диамагнетикам иного толка, чем те, о которых шла речь выше.

ТОК, КОТОРЫЙ НИКОГДА НЕ ЗАТУХАЕТ

В 1911 г. голландский физик Х. Камерлинг-Оннес, незадолго перед тем научившийся получать жидкий гелий и тем самым достигать очень низких температур — вблизи абсолютного нуля, изучая сопротивление металлов в этой низкотемпературной области, обнаружил удивительное явление: по достижении некоторой температуры, получившей впоследствии название *критической*, сопротивление скачком падало до нуля. Что это означало? Нулевое сопротивление означало, в частности, что электрический ток, однажды возникнув в таком металле при температуре ниже критической, никогда бы не затухал. Такие состояния называли *сверхпроводящими*, а сами материалы, способные переходить при низких температурах в подобное состояние, — *сверхпроводниками*. Двадцать два года спустя немецкий физик В. Мейсснер обнаружил эффект, который носит теперь его имя. Эффект состоял в том, что если сверхпроводник при температуре выше критической (говорят, что он находится в нормальном со-

стоянии) был помещен в магнитное поле, то при понижении температуры ниже критической магнитное поле вытеснялось из толщи массивного сверхпроводника.

Теоретическое понимание физических явлений, лежащих в основе сверхпроводимости, потребовало длительных усилий не одного поколения ученых.

Первая удачная попытка объяснения сверхпроводимости связана с именами английских физиков братьев Лондонов (она относится к 1935 г.). Им удалось объяснить эффект Мейсснера, а заодно показать, что магнитное поле не целиком вытесняется из сверхпроводника. В действительности оно проникает в тонкий поверхностный слой, который теперь называется *лондоновским слоем*. Его толщина для низкотемпературных сверхпроводников составляет примерно 500 Å ($1 \text{ Å} = 10^{-10} \text{ м}$), но теория Лондонов указывала толщину, в несколько раз меньшую действительной. Эта теория была феноменологической и представляла собой по существу теорию электромагнитного поля Максвелла, модифицированную с учетом особенностей сверхпроводников. Можно сказать, что теория братьев Лондонов (заслуги которых велики и отмечены учреждением медали их имени, присуждаемой за выдающиеся работы в области сверхпроводимости) объясняла, что должно происходить со сверхпроводником, но не объясняла, почему поведение сверхпроводника было таким, а не иным.

Тем не менее феноменологическая теория продолжала развиваться и получила свое завершение в работах двух советских физиков — академиков В. Л. Гинзбурга и Л. Д. Ландау. Теория Гинзбурга — Ландау, основанная на теории Ландау фазовых переходов второго рода (о ней речь впереди), появилась в 1950 г. Она верно и весьма подробно описывала поведение сверх-

проводников в магнитном поле. На ее основе было установлено, что существуют сверхпроводники первого и второго родов. Они различаются тем, что сверхпроводники первого рода переходят в сверхпроводящее состояние скачком (это и наблюдал Камерлинг-Оннес), тогда как сверхпроводники второго рода совершают этот переход как бы постепенно, на конечном температурном интервале. В последнем случае сверхпроводник характеризуется двумя критическими температурами: начала и конца перехода. Позже академику А. А. Абрикосову удалось показать, что в отличие от сверхпроводников первого рода, характеризующихся существованием критического значения магнитного поля, при превышении которого магнитное поле «врывается» в сверхпроводник, разрушая сверхпроводимость, у сверхпроводников второго рода картина иная: по достижении определенного значения магнитного поля в таком сверхпроводнике возникают *вихревые нити* («*вихри Абрикосова*»), которые постепенно, с ростом напряженности магнитного поля, все больше и больше заполняют объем сверхпроводящего образца, пока не заполнят его целиком. Однако микроскопическое понимание природы сверхпроводящего состояния было достигнуто позже.

Чтобы понять «микроскопическую» точку зрения, поговорим немного об электронах в металле. Как известно, металл является кристаллом и обладает кристаллической решеткой. Эта решетка представляет собой регулярную систему точек в пространстве, в которых расположены *ионы* — атомы, лишенные одного или нескольких электронов. Недостающие электроны «омывают» эту решетку, передвигаясь по кристаллу относительно свободно. Совокупность электронов в металле называют еще *электронным газом*. Наличие свободных (в отличие от связанных, локализованных

около атомных ядер) электронов в известном смысле предопределяет свойства металлов как хороших проводников электрического тока. Если к металлическому образцу (например, к проволоке) приложить разность потенциалов, или электрическое напряжение, то по образцу пойдет электрический ток — направленный поток электронов. Если бы ионы находились в точности в узлах кристаллической решетки, то электроны передвигались бы по кристаллу свободно, как бы «не замечая» существования ионов. Однако в действительности ионы не локализованы в узлах, а под влиянием температуры совершают колебательные движения, то приближаясь к узлам решетки, то отдаляясь от них. В результате электроны рассеиваются на колебаниях решетки. Это-то рассеяние и служит причиной появления сопротивления прохождению электрического тока через металлы. Таким образом, если в металлическом кольце возбудить ток, то через конечное время он затухнет (электроны в результате рассеяния прекратят упорядоченное движение). Помимо колебаний решетки, причиной рассеяния могут служить *дефекты* решетки — различные искажения, нарушающие ее строгую периодичность. Ими могут являться *примеси* — атомы иных сортов, чем те, из которых состоит данный металл, *вакансии* — незанятые узлы решетки и др.

Для того чтобы ток, возбужденный в металлическом кольце (оставим в стороне вопрос, как этого можно достичь), не затухал, а именно это происходит в сверхпроводящем кольце, необходимо, чтобы электроны не рассеивались.

Сначала Г. Фрелих высказал предположение, что в сверхпроводящем состоянии электроны взаимодействуют с решеткой специальным образом, так что через решетку они как бы взаимодействуют друг с другом. Таким образом, Фрелих предложил для объяснения

отсутствия сопротивления в металлическом сверхпроводнике такое явление, которое в нормальном металле служит причиной наличия сопротивления, — взаимодействие электрона и решетки. Вслед за ним американский физик Л. Купер предположил, что электроны образуют *пары* («куперовские пары»), причем в пару объединяются электроны с противоположными магнитными моментами, или противоположными спинами. Но ведь электроны — это заряженные частицы, причем все электроны имеют одинаковые заряды, и, согласно закону Кулона, они должны отталкиваться. О каких парах можно говорить?

Представьте себе двух человек, которые до того неприязненно относятся друг к другу, что ни при каких условиях не захотят находиться в одной компании: заведя своего недружелюбного визави, второй постарается немедленно удалиться. Теперь представьте себе тех же двоих, которые, не узнав друг друга, зашли в кабину лифта, а лифт из-за неисправности застрял между этажами. Хочешь — не хочешь, а будешь находиться в одном помещении, пока механик не запустит лифт.

В сверхпроводнике роль такой «лифтовой кабины» играет решетка. Взаимодействуя с ней, электроны начинают иначе «относиться» друг к другу. Они как бы «забывают» закон Кулона, и отталкивание между ними сменяется притяжением. И хотя эта куперовская пара имеет по микроскопическим масштабам солидные размеры: электроны в паре находятся на расстоянии примерно 10^{-4} см друг от друга (это всего лишь тысячная доля миллиметра), при температурах ниже критической температуры сверхпроводящего перехода эта пара оказывается весьма устойчивой и что самое главное — она движется через кристаллическую решетку без рассеяния. И ток, индуцированный в сверхпроводящем кольце, будет циркулировать в нем, не затухая.

Таковы, коротко говоря, особенности сверхпроводников как проводников электрического тока. Перейдем теперь к рассмотрению их магнитных свойств.

В основе магнитных свойств сверхпроводника лежит уже упоминавшийся эффект Мейсснера. С формальной точки зрения вытеснение магнитного поля из сверхпроводника означает, что магнитная индукция \mathbf{B} , связанная с внешним магнитным полем соотношением $\mathbf{B} = (1 + 4\pi\chi)\mathbf{H}$, равна нулю. Поскольку напряженность магнитного поля \mathbf{H} нулю не равна, это означает, что величина $1 + 4\pi\chi$ равна нулю, или $\chi = -1/(4\pi)$. Мы уже знаем, что отрицательной магнитной восприимчивостью обладают диамагнетики. Существование эффекта Мейсснера означает, что сверхпроводники являются диамагнетиками. Поскольку же они полностью компенсируют внешнее магнитное поле, вытесняя его из своего объема, то их можно рассматривать как идеальные диамагнетики. Порядок величины диамагнитной восприимчивости сверхпроводников равен 10^{-2} . Это на несколько (от двух до четырех) порядков выше, чем восприимчивость обычных диамагнетиков, диамагнетизм которых основан на ларморовой прецессии электронов.

Приведенное выше соотношение магнитной индукции и напряженности внешнего магнитного поля верно для сверхпроводников первого рода, о которых говорилось выше, при значениях напряженности поля ниже критического (оно обозначается H_c). Экспериментально было установлено, что значение критического поля зависит от температуры, причем

$$H_c(T) = H_c(0) (1 - T^2/T_c^2).$$

Здесь T_c — критическая температура сверхпроводящего перехода (перехода нормальный металл — сверхпроводник), ниже которой, собственно говоря, сверхпрово-

дящий материал и переходит в сверхпроводящее состояние. Из приведенного выражения для значения напряженности критического поля следует, что максимальное значение H_c , равное $H_c(0)$, достигается при абсолютном нуле температуры. С ростом температуры значение напряженности критического поля начинает падать по параболическому (квадратичному) закону и обращается в нуль в самой критической точке при $T = T_c$. Конкретные значения H_c зависят от металла. Так, для цинка $H_c(0) = 53$ Гс ($1 \text{ Гс} = 10^{-4} \text{ Тл}$), для титана — 162 Гс, а для свинца — 803 Гс. Если учесть, что критическая температура для перечисленных металлов равна соответственно 0,79; 1,81 и 7,26 К, то нетрудно заметить, что значение критического поля тем выше, чем выше критическая температура сверхпроводящего перехода.

Итак, сильное магнитное поле разрушает сверхпроводимость. Что будет, если через сверхпроводник пройдет ток? Ведь ток также создает магнитное поле. Оказывается, для сверхпроводимости в смысле ее устойчивости по отношению к магнитному полю природа этого поля значения не имеет. Поскольку поле, порождаемое током, пропорционально силе тока, то с ростом силы тока растет и индуцируемое им магнитное поле. И точно так же, как в случае внешнего магнитного поля, при достижении этим индуцированным полем критического значения сверхпроводящее состояние будет разрушено. Происходит как бы «самоуничтожение» сверхпроводника, в результате которого он переходит в нормальное состояние. В связи с этим наряду с критической температурой T_c и критическим полем H_c важной характеристикой сверхпроводника является значение критического тока I_c , а точнее говоря, плотности критического тока, так как важно не абсолютное значение силы тока, проходящего через сверхпровод-

ник, а его значение на единицу площади поперечного сечения.

Более сложно обстоит дело с магнитными свойствами сверхпроводников второго рода. Как уже говорилось, разрушение сверхпроводящего состояния в таких сверхпроводниках происходит не сразу, не скачком, как в сверхпроводниках первого рода, о которых мы только что говорили, а постепенно. В связи с этим сверхпроводники второго рода характеризуются двумя значениями критического магнитного поля: *нижним* H_{c1} и *верхним* H_{c2} , причем $H_{c1} < H_{c2}$. Ниже нижнего значения критического поля H_{c1} сверхпроводник второго рода полностью выталкивает из себя магнитное поле и в этом смысле ничем не отличается по своему магнитному поведению от сверхпроводника первого рода. Когда значения внешнего магнитного поля лежат в промежутке между H_{c1} и H_{c2} , магнитное поле частично проникает в сверхпроводящий образец. И там, где это происходит, сверхпроводящее состояние разрушается. Следовательно, в образце сверхпроводящего металла чередуются области сверхпроводящие и нормальные. При этом магнитные области нормального состояния, через которые проходит магнитное поле, представляют собой нити, называемые *вихревыми*. По мере того как значение напряженности внешнего магнитного поля возрастает от H_{c1} до H_{c2} , количество нормальных областей, или вихревых нитей, возрастает, плотность их увеличивается, они сближаются, пока, наконец, при достижении полем значения H_{c2} не заполняют весь объем металла, и сверхпроводимость окончательно разрушается.

Своеобразная ситуация возникает, когда магнитное поле неоднородно. При этом в одних точках поле может достигать критического значения, а в других — нет. Что же будет в этом случае?

В тех областях, где внешнее поле достигнет критического значения, сверхпроводимость разрушится, и это будут области нормального состояния. Там же, где значения поля меньше критического, сверхпроводимость сохранится. Такая «чересполосица» нормальных и сверхпроводящих областей называется *промежуточным состоянием сверхпроводника*.

Все сказанное выше относится к металлическим сверхпроводникам, критическая температура которых довольно мала. Долгое время исследователи работали над поиском таких систем, у которых температура сверхпроводящего перехода выходила бы из области гелиевых температур. Первоначальные успехи были связаны со сплавами, но они позволили поднять критическую температуру лишь несколько выше 20 К. Рекордсменом здесь был сплав ниобия и германия с критической температурой $T_c = 24$ К.

Поиски, однако, не прекращались, и в 1986 г. они увенчались успехом: Дж. Беднорц и К. Мюллер из швейцарского филиала фирмы IBM обнаружили сверхпроводимость в керамике, в состав которой входили лантан, барий, медь и кислород. Критическая температура этих новых сверхпроводников приближалась к 40 К. Такие сверхпроводники называли «*неоновыми*», так как их сверхпроводящее состояние сохранялось при температуре кипящего неона (27,2 К), поддерживать которую легче, чем температуру кипения гелия (4,2 К).

На этом дело не остановилось. В 1987 г. группа американских исследователей обнаружила сверхпроводимость у другой керамики, в состав которой входили иттрий, барий, медь и кислород. Температура сверхпроводящего перехода этого класса веществ (а место иттрия, как вскоре обнаружилось, могут занимать многие другие редкоземельные элементы) лежала в об-

ласти 90 К. Это были уже «азотные» сверхпроводники, поскольку температура кипения азота равна 77,4 К (эта температура, как и вышеприведенные, дана для атмосферного давления). С технической и особенно с прикладной точек зрения появление «азотных» сверхпроводников явилось колоссальным прогрессом, поскольку получение азотных температур и их поддержание намного проще, чем неоновых или тем более гелиевых. Немаловажно и то обстоятельство, что литр жидкого азота обходится примерно в сто раз дешевле литра жидкого гелия. Технология производства новых керамических сверхпроводников также оказалась достаточно простой: в США выпускаются наборы реактивов, из которых в обычных печах для обжига керамики можно приготовить сверхпроводник; цена при этом доступна школьникам.

Сверхпроводящие керамики обнаруживают отчетливые диамагнитные свойства, т. е. эффект Мейсснера имеет место и для них. Исследования показали, что новые сверхпроводники являются сверхпроводниками второго рода. Так что все, сказанное о сверхпроводниках второго рода, относится и к сверхпроводящим керамикам. Выявились и некоторые их недостатки: способность «стареть», т. е. утрачивать со временем свои сверхпроводящие свойства, неустойчивость к воздействию влаги, зависимость температуры перехода от технологии их производства и многие другие. Тем не менее открытие «азотных» проводников — это выдающееся достижение физики сверхпроводящего состояния. Теоретическое осмысление новых материалов интенсивно ведется, предложено много моделей, но окончательный выбор в пользу какой-нибудь одной пока еще не сделан.

Ученые надеются на открытие «комнатных» сверхпроводников, которые будут находиться в сверхпрово-

дящем состоянии при комнатных температурах. Когда это произойдет? Каковы будут свойства, включая магнитные? Прорыв 1986 г. был настолько неожиданным и стремительным, что прогнозы в этой области — дело безнадежное. Возможно, «комнатные» сверхпроводники будут получены, когда эта книга выйдет из печати, возможно, нет. Как говорится, жизнь покажет.

А пока мы перейдем к рассмотрению магнитных свойств других материалов, которые существуют сегодня и неплохо изучены. Речь пойдет о ферромагнетиках.

БЛИЗНЕЦЫ, ИЛИ ИГРА В ПРЯТКИ

Хотя структура атома не представляла более загадки, тайна продолжала оставаться тайной. Происхождение намагниченности железа все еще было не более понятным, чем до открытия структуры атома и появления квантовой механики. Для объяснения ферромагнетизма необходимо было сделать еще один шаг.

Есть старая сказка о зайце, состязавшемся в беге с ежом. Заяц, прекрасно осведомленный о скоростных способностях ежа, не сомневался в успехе. Еж, также не сомневавшийся в собственных «скоростных» способностях, договорился со своим близким родственником, который перед началом состязания занял место на финише. Когда заяц, стартовав вместе с ежом, примчался к финишу, он обнаружил там ежа, который заявил, что он уже давно дожидался зайца. Заяц не поверил своим глазам и предложил повторить состязание. Вся ситуация, естественно, повторилась в обратном порядке. Ежи были неразличимы, и дело закончилось тем, что обессиленный заяц сдался.

Если бы заяц из сказки попал в мир электронов, он обнаружил бы, что электроны неразличимы так же,

как его соперники по состязанию в беге. Неразличимость частиц явилась новшеством, которое принесла с собой квантовая механика. Почему частицы стали неразличимы? И почему они различимы в классической механике?

Правильный ответ заключается в том, что таковы объективные свойства частиц. В классической механике можно абсолютно точно указать, где находится одна частица и где — другая. В квантовой механике можно лишь с некоторой вероятностью утверждать, что данная частица находится в данной точке.

Здесь необходимо сделать маленькое отступление. Понятие вероятности возникает там, где разыгрываемая ситуация может иметь несколько исходов. Простейшими примерами являются бросание монеты (два исхода: орел и решка), игральной кости с шестью гранями (шесть исходов). Бросая кость, мы не можем заранее сказать, какая грань окажется верхней. Но поскольку кость устроена так, что ни одной из граней не оказано никакого предпочтения, то вероятность выпадения любого числа — от единицы до шестерки — одинакова и равна $1/6$. Это число означает лишь, что при достаточно продолжительном бросании кости любая из граней выпадает в одной шестой части случаев.

Чтобы перекинуть мост от игральной кости к электрону, произведем некоторое усложнение устройства кости. Заменим, например, шестерку единицей. Ясно, что при бросании кости с двумя единицами чаще будет выпадать единица. Нетрудно догадаться, что вероятность ее выпадения увеличится вдвое и будет равна $1/3$.

Похожим образом характеризуется в квантовой механике состояние электрона или системы электронов. Вероятность «выпадения» электрона в некоторой точке пространства равна некоторому числу. Множество та-

ких чисел для всех точек пространства определяет *функцию распределения*. Откуда берется эта функция? Она является квадратом *волновой функции*, которая сама по себе не имеет вероятностной интерпретации. Волновая же функция удовлетворяет *уравнению Шрёдингера*, выписывать и тем более решать которое мы здесь не будем. Нам важно, что такое уравнение существует и решение его в принципе можно найти. Заметим все же, что уравнение Шрёдингера — это дифференциальное уравнение в частных производных, и физики вместе с математиками разработали немало методов его решения.

Как обстоит дело, если имеется два электрона? Для двух электронов также существует волновая функция, зависящая, конечно, от координат обоих электронов. Но ведь электроны неразличимы. Что будет, если поменять их местами? Правила квантовой механики говорят, что волновая функция должна изменить знак при такой перестановке. Это свойство волновой функции называется *антисимметричностью*; им обладают волновые функции частиц с полуцелым спином, к которым, как мы знаем, относятся и электроны. Такие частицы носят название *фермионов*, так как подчиняются статистике Ферми — Дирака, названной так в честь ее открывателей.

Из свойства антисимметричности непосредственно следует *принцип Паули*. Предположим, что два электрона находятся в одинаковых состояниях. Перестановка их, с одной стороны, не должна изменить знак волновой функции — ведь с физической точки зрения ничего не изменилось, но, с другой стороны, при всякой перестановке электронов волновая функция должна менять знак. Примирить это противоречие можно только одним способом, известным еще из школьной алгебры: если какое-то число равно само себе с противоположным

знаком, то это число есть не что иное, как нуль. Равенство нулю волновой функции влечет за собой и равенство нулю ее квадрата, т. е. вероятность обнаружения двух электронов в одном и том же состоянии равна нулю. Это утверждение и составляет принцип запрета Паули. Заметим, что дело обстоит иначе для частиц с целым спином — *бозонов*, подчиняющихся статистике Бозе — Эйнштейна: волновая функция таких частиц не меняет знака при перестановке. Это означает, что никакого противоречия при перестановке двух бозонов не возникает, и, следовательно, любое число их может находиться в одном состоянии. Впрочем, свойства бозонов нам не понадобятся. Вернемся к электронам, которые, как нам уже известно, являются фермионами.

Наиболее простой системой, содержащей электрон, является атом водорода. Элемент номер один периодической системы элементов состоит из ядра, содержащего единственный протон, и одного электрона (мы не рассматриваем здесь изотопы водорода — дейтерий и тритий, в ядрах которых содержатся дополнительно один и два нейтрона). Задача нахождения волновой функции электрона, движущегося в поле ядра, состоящего из одного протона, решается с математической точки зрения относительно просто.

Большой интерес представляет для нас образование, содержащее два электрона. Речь, однако, идет не об атоме гелия, а о молекуле водорода. Это небольшое, казалось бы, усложнение задачи приводит к математическим трудностям, которые не удастся преодолеть. Хотя уравнение для волновой функции системы двух протонов и двух электронов можно записать совершенно строго, решить его аналитически, т. е. получить решение в виде формулы, не удастся. Не удастся тем самым определить и строение молекулы водорода: ведь нам неизвестна волновая функция, и мы, следовательно,

не знаем, какова вероятность появления электрона в той или иной точке.

Способ решения задачи о строении молекулы водорода был предложен В. Гайтлером и Ф. Лондоном. Мы остановимся на нем подробнее, потому что результаты, полученные для молекулы водорода, послужили толчком, приведшим в конце концов к объяснению *ферромагнетизма*.

Однако перед этим сделаем еще одно отступление, посвященное *устойчивости*. Само по себе слово «устойчивость», кажется, не требует объяснений. Физики вкладывают в это понятие смысл, не слишком отличающийся от того, который ясен интуитивно. Устойчивое положение равновесия тела или системы тел — это, вообще говоря, такое, из которого тело или систему трудно вывести. Физическое толкование слова «устойчивость» отличается от бытового тем, что слово «трудно» получает не только качественное, но и количественное толкование.

Прежде всего равновесное состояние характеризуется минимумом или максимумом (экстремумом) потенциальной энергии. Чтобы представить это наглядно, вообразите тренажер, напоминающий качели, но без ограничения раскачки, так что можно вращаться на 360° . У такого тренажера два положения равновесия: крайнее нижнее и крайнее верхнее. Эти положения, разумеется, неодинаковы, и понятно, чем они различаются: верхнее положение неустойчиво (оно соответствует максимуму потенциальной энергии), тогда как нижнее устойчиво (соответствует минимуму). Вот признак, по которому можно отличить устойчивое состояние равновесия от неустойчивого: если слегка отклонить систему от устойчивого положения равновесия, ее потенциальная энергия возрастает — именно это и происходит, когда вы раскачиваетесь на качелях;

отклонение от неустойчивого положения равновесия приводит к понижению потенциальной энергии. Предположим, что вы раскачиваетесь на тренажере и остановились в вертикальном положении вниз головой (как ни трудно это сделать). Ясно, что удержаться в этом положении весьма нелегко: стоит вам отклониться от вертикального положения равновесия на самую малость, как вас неудержимо потянет вниз, и без дополнительных усилий тренажер не вернется в это состояние. Важное отличие устойчивого положения равновесия от неустойчивого заключается еще и в том, что, будучи выведенной из него, система стремится вернуться к начальному состоянию — пример качелей здесь также подходит как нельзя лучше: как бы вы ни раскачивались, качели будут стремиться в наинизшее состояние с наименьшей потенциальной энергией. Как только вы прекратите раскачиваться, качели по прошествии определенного времени остановятся именно в этом наинизшем положении.

Оказывается, для многих физических систем характерно стремление занять положение устойчивого равновесия с наименьшей энергией. Если система находится в каком-либо другом состоянии и не прилагается никаких внешних усилий, которые бы это состояние поддерживали, по прошествии некоторого времени, подобно качелям, система придет в состояние с наименьшей энергией. Конечно, способ, которым система переходит в это устойчивое состояние, и время перехода определяются конкретным видом системы. Например, время, за которое качели остановятся, определяется начальной амплитудой и силами трения.

Что касается атома, то он может находиться в «возбужденном» состоянии. Переход в это состояние обусловлен различными причинами: столкновением с другим атомом, в результате которого атом получает до-

полнительно энергию, поглощением электромагнитного излучения, химической реакцией и т. д. Это возбужденное состояние всегда связано с избытком энергии, от которого атом стремится избавиться, чтобы перейти в состояние с наименьшей энергией, называемое *основным*.

Принцип минимальности энергии основного состояния является мощным инструментом в руках исследователя. Как им пользуются?

Предположим, у вас есть два десятка кубиков и вы хотите выстроить из них «домик». У вас имеется, например, пять различных вариантов, но вы хотите выбрать наиболее устойчивый. Попробуйте поставить кубики один на другой в виде столбика. Вряд ли такая конструкция отвечает критерию наибольшей устойчивости: малейшее движение, и ваш «домик» рухнет. Два столбика по десять кубиков, несомненно, более устойчивы. Комбинируя дальше, вы сможете отобрать несколько конструкций, которые «на глаз» обладают примерно одинаковой устойчивостью. Какую из них выбрать? Вот тут-то и вступает в действие принцип минимальности энергии. Как скрупулезный бухгалтер, он тщательно подсчитает энергию различных вариантов и, найдя наименьшую, безошибочно укажет на самый устойчивый из них.

Вернемся к молекуле водорода. Разберемся сначала, из чего складывается ее энергия. Молекула содержит два протона и два электрона. Все четыре частицы взаимодействуют между собой, ведь все они заряжены, и, следовательно, энергия взаимодействия описывается законом Кулона — она пропорциональна произведению зарядов и обратно пропорциональна расстоянию между частицами. Дело несколько упрощается, если вспомнить, что протоны примерно в две тысячи раз тяжелее электронов. Это дает достаточные

основания считать протоны неподвижными, находящимися в определенных точках, т. е. рассматривать их классически, а не по правилам квантовой механики; хотя на самом деле протоны следует описывать также на основе квантовой механики, приближенно можно поступать вышеописанным образом. Итак, мы знаем, где находится один протон и где — другой; вопреки квантовой механике мы их различаем. Зато электроны как легкие частицы мы будем рассматривать с точки зрения квантовой механики.

Начнем решение задачи с того, что мысленно удалим ядра-протоны друг от друга. Молекула водорода при этом «распадется» на два атома водорода. Но мы уже знаем, что для атома водорода можно найти волновую функцию электрона и тем самым определить вероятность нахождения электрона на данном расстоянии от ядра. Какого электрона? Не спешите ответить на этот вопрос. Можно рассуждать так: когда два атома водорода объединились в молекулу, каждый атом принес в общую «копилку» свой электрон. Когда же мы мысленно разъединили атомы, каждый из них забрал электрон назад. И вот тут мы подходим к главному моменту. Мы не знаем, какой электрон находится около данного протона: ведь электроны неразличимы! Следовательно, при расчете энергии молекулы водорода мы должны учесть и то состояние, в котором каждый электрон находится около «своего» атома, и то, в котором он находится около «чужого». Такое рассуждение носит, разумеется, приблизительный характер, но для более точной формулировки необходимо привлечь достаточно сложные математические выкладки, а именно этого хотелось бы избежать. «Свое» расположение соответствует обычной электростатической кулоновской энергии. Энергия, которой молекула водорода обладает благодаря обмену электронами, также имеет

электрическую природу, но ее существование следует из невозможности отличить один электрон от другого. Эта энергия называется *обменной* и имеет чисто квантово-механическое происхождение.

Итак, приступим к «бухгалтерии». Полная энергия молекулы водорода складывается из следующих компонентов: 1) $2E_0$ — той энергии, которую имели атомы водорода до объединения; 2) C — кулоновской энергии взаимодействия электронов и ядер; 3) A — обменной энергии. Теперь надо бы все эти компоненты сложить, но перед тем, как это сделать, вспомним о магнитных моментах. Действительно, мы затеяли весь этот расчет, чтобы выяснить что-то о магнетизме, а магнитные моменты вообще не рассматриваем, подсчитывая только электрическую энергию. Совершенно ясно, что магнитные моменты тоже взаимодействуют, причем таких взаимодействий множество: собственные и орбитальные моменты взаимодействуют между собой и друг с другом. К счастью, эта энергия оказывается очень малой — в тысячу раз меньше электрической, и это дает основание ее не учитывать, по крайней мере вначале. Но нельзя не учитывать свойства симметрии, связанные опять-таки с неразличимостью электронов. Мы помним, что при перестановке электронов волновая функция должна менять знак. И это обстоятельство оказывается прямо связанным со спинами. Поскольку в молекуле водорода есть только два электрона, их спины могут быть расположены двумя способами: параллельно (направлены в одну сторону) и антипараллельно (направлены в противоположные стороны). В первом случае молекула водорода будет иметь постоянный магнитный момент, во втором результирующий магнитный момент равен нулю.

Свойства симметрии, по которым волновая функция меняет знак, имеют еще одно следствие: в первом

случае обменную энергию надо вычесть из полной, во втором — прибавить.

Итак, возможны два состояния молекулы водорода: с параллельными спинами и энергией:

$$2E_0 + C - A$$

и с противоположно направленными спинами и энергией:

$$2E_0 + C + A.$$

Какое из состояний выгоднее? Мы уже знаем, что более устойчиво то состояние, которое характеризуется меньшей энергией. Выходит, что параллельное расположение спинов выгоднее? Ведь обменная энергия вычитается в этом случае из полной. Это верно, если обменная энергия положительна, но если она отрицательна, все будет наоборот! Итак, расположение спинов зависит от знака обменной энергии. В таком случае возникает естественный вопрос: зависит ли от чего-нибудь этот знак, и если зависит, то от чего? Что касается молекулы водорода, ответ достаточно прост: расчеты показали, что обменная энергия для нее отрицательна, и, следовательно, молекулярный водород не имеет результирующего магнитного момента. Здесь нужно оговориться: обменная энергия зависит от расстояния между ядрами атомов, составляющих молекулу, быстро устремляясь к нулю при удалении ядер. При очень малых расстояниях обменная энергия меняет знак. Однако сблизить ядра молекулы водорода — задача непростая. Для этого необходимо сильно сжать водород, и давления должны быть огромными. Если бы эти давления удалось осуществить, молекула водорода обязательно имела бы магнитный момент, потому что такое состояние стало бы энергетически выгодным. Однако в нормальных условиях обменная

энергия отрицательна и магнитный момент молекулы водорода равен нулю. Главный вывод, который следует из рассмотрения молекулы водорода, заключается в том, что энергия оказывается связанной со значением магнитного момента, ведь два рассмотренных состояния — с нулевым и ненулевым моментами — имеют различные энергии.

С молекулой водорода мы, кажется, разобрались. При чем, однако, здесь магнит?

ПОХОЖИЕ НА ВОДОРОД

Существование обменной энергии создавало некоторые предпосылки для теории магнетизма. Нужно было только найти элементы, у которых обменная энергия была бы положительной. Поскольку известно, какие именно элементы являются магнитными, то задача вроде бы упрощалась. Классические магнетики — железо, никель и кобальт — соседи по периодической системе элементов Менделеева. Нужно сосчитать для атомов этих элементов обменную энергию, убедиться, что она положительна, и объяснение ферромагнетизма готово. Такую программу, однако, легче наметить, чем осуществить. Расчет даже молекулы водорода, содержащей всего-навсего два электрона, далеко не прост. Что же говорить о железе, атом которого содержит 26 электронов!

И все-таки ситуация не совсем безнадежна. Здесь, как и в других случаях, когда необходимо учесть слишком много факторов, на помощь приходит *модель*. Хотя это слово вам наверняка известно, в физике в него вкладывают несколько иной смысл, чем это делают в повседневной жизни. Чтобы проиллюстрировать понятие модели, ненадолго вернемся к расчету энергии молекулы водорода и вспомним, чего мы не учли в этом

расчете. С самого начала мы стали считать ядра неподвижными, расположенными в определенных точках, хотя протоны — это микрочастицы, подчиняющиеся правилам квантовой механики, для которых можно указать лишь вероятность обнаружения их в данном положении. Протоны также обладают полуцелым спином, магнитные моменты протонов взаимодействуют друг с другом — это не было учтено. Уже указывалось, что мы пренебрегли магнитным взаимодействием электронов, причем взаимодействием как орбитальных, так и собственных моментов. К тому же оказалось не учтенным взаимодействие магнитных моментов электронов и ядер.

Казалось бы, отбросив столько факторов, надеяться на успех невозможно, однако результат получился правильным. Почему? Потому что мы построили модель молекулы водорода, которая правильно передает ее главные черты. Эту модель можно уточнить, добавляя те или иные факторы. Учитывая, например, взаимодействие магнитных моментов электронов, мы обнаружили бы, что у молекулы имеется не два, а четыре возможных состояния. Рассматривая поведение протонов по законам квантовой механики, мы обнаружили бы, что обменные эффекты справедливы и для них и что существуют два вида молекул водорода: ортоводород и параводород, различающиеся параллельным и антипараллельным расположением магнитных моментов ядер.

Итак, модель — это огрубленная картина реальной физической системы, в которой «нарисованы» только главные детали.

Мысль о том, что именно обменное взаимодействие ответственно за ферромагнетизм, пришла почти одновременно сразу двум людям: советскому физiku Я. И. Френкелю и одному из создателей квантовой

механики немецкому ученому В. Гейзенбергу. Но чтобы в этом разобраться, вернемся к электронной структуре атома.

Мы уже говорили, что понятие орбиты для электрона в атоме не может быть сохранено в квантовой механике. Если к тому же учесть неразличимость электронов, то станет ясно, что, строго говоря, нельзя выделить отдельный электрон из всех, окружающих ядро. И все-таки приближенно в электронной системе атома можно навести некое подобие «учета». Оказывается, электроны распределены по слоям, каждый из которых имеет свой номер n , начиная с единицы: $n = 1, 2, \dots$. Каждый слой (называемый иногда *оболочкой*) может содержать не более $2n^2$ электронов. Это означает, что в первом слое — 2 электрона, во втором — 8, в третьем — 18, в четвертом — 32, в пятом — 50 и т. д. Как только в слое с номером n заполнено $2n^2$ мест, слой становится замкнутым. Таблица Менделеева служит хорошим ориентиром для определения заполненности слоев: так называемые инертные, или благородные, газы имеют полностью заполненные оболочки. Элементы первой группы, следующие за ними, — щелочные металлы — начинают заполнять следующий слой, у них на внешней оболочке (оболочке со старшим номером) имеется по одному электрону. Замкнутые слои «прочные». Изъять из них электроны — нелегкая задача. Это и служит причиной «инертности» инертных газов.

Помимо порядкового номера n оболочки, который соответствует главному квантовому числу, внутри слоя существует дополнительный порядок: состояния электронов различаются значением орбитального квантового числа l , что соответствует различным значениям орбитального момента импульса (о нем уже шла речь), и электроны располагаются в подоболочках. Наконец, классификация включает и

магнитные квантовые числа m_l и m_s , соответствующие орбитальному и собственному (спиновому) магнитному моменту электрона. Согласно принципу Паули, в атоме (да и в любой системе электронов) не может быть двух электронов в одинаковых состояниях, т. е. тех, которым отвечают одинаковые наборы квантовых чисел n , l , m_l , m_s .

Что дает такая классификация? В общем, немало. Она позволяет разобраться в спектрах излучения. Что касается магнетизма, то наиболее важный вывод, следующий из структуры атома, заключается в том, что магнитный момент замкнутой оболочки равен нулю. Это означает, что магнетизм атома обусловлен магнитными моментами незаполненных оболочек.

Итак, в электронной структуре атома существует строгий порядок? Да, порядок действительно существует, но строгость его оказывается не универсальной. Начиная с калия, занимающего в таблице Менделеева место под номером 19, порядок нарушается. Вместо того чтобы заполнять в оболочке очередную «полочку» — подоболочку, атом калия пропускает одну из них и начинает заполнять следующую. Идущий за ним кальций (его номер в периодической таблице — 20) снова нарушает порядок, добавляя второй электрон на «внеочередное» место. И только элемент с номером 21 — скандий, словно спохватившись, начинает (за)полнять «пропущенную» подоболочку. Следующие за скандием титан и ванадий расставляют электроны «правильно», продолжая заполнять пропущенное, но идущий за ними хром нарушает даже этот нарушенный порядок. На внеочередном уровне у него остается один электрон, а на пропущенном прибавляются сразу два! Стоящий далее марганец «восстанавливает» несправедливость, допущенную хромом по отношению к внеочередной подоболочке, добавляя в нее второй электрон. За мар-

ганцем следуют три элемента: железо, кобальт и никель, продолжающих заполнение пропущенной оболочки. Эти три элемента, входящих, как и перечисленные, в группу железа, и представляют для нас наибольший интерес, потому что они являются ферромагнетиками. Группу замыкает медь, добавляющая десятый электрон на пропущенную подоболочку (именно столько она и может вместить), после чего заполнение оболочек снова идет по «строгим» правилам.

Элементы, которые имеют незаполненные внутренние оболочки, называются *переходными*. Те элементы, у которых все оболочки заполняются последовательно, без «пропусков», называются *нормальными*.

Число переходных элементов не ограничивается группой железа. К ним также относятся металлы группы палладия, группы платины, так называемые редкоземельные элементы — лантаниды и актиниды.

В чем причина появления «нарушителей» атомной электронной структуры? Оказывается, причина заключается все в том же принципе минимальности энергии. Пропуски, начало которым положено калием, энергетически выгодны. Заполнение внешней оболочки при пропущенной внутренней соответствует меньшей энергии электронной системы, причем это объясняет существование всех переходных элементов.

С «магнитной» точки зрения эти элементы важны именно вследствие незаполненности внутренних оболочек — ведь заполненные оболочки имеют нулевой магнитный момент, а магнитный момент незаполненных нулю не равен.

С другой стороны, совершенно точно известно, что только часть переходных элементов является ферромагнетиками. Отсюда можно сделать следующий вывод: незаполненность внутренней оболочки — необходимое, но не достаточное условие для того, чтобы

вещество проявляло сильные магнитные свойства.

До сих пор речь шла об отдельном атоме. Но так же, как описание боевых качеств отдельного солдата еще не означает выяснения боеспособности дивизии, так и свойства отдельного атома мало говорят о свойствах их совокупности, которой могут быть газ, жидкость или твердое тело.

Что происходит со структурой атомов, когда их много и они взаимодействуют? Наибольший интерес для нас будут представлять кристаллические твердые тела. Оказывается, когда атомы находятся в кристалле, их электронная структура существенно меняется. Причиной этих изменений служит в первую очередь тот факт, что атомы в кристалле оказываются друг от друга на расстояниях, сравнимых с их собственными размерами.

В результате та структура, которую мы только что подробно описывали, становится иной. Прежде всего это касается электронов, находящихся на внешней, незаполненной оболочке и называемых *валентными*. Эти электроны, как говорят, *коллективизируются*, что означает утрату их принадлежности к какому-либо конкретному атому, или *делокализацию*. То, что остается в результате от атомов, — ионы — образует кристаллическую решетку, омываемую электронным «морем». Описанная картина справедлива для металлов, а коллективизированные электроны становятся в них *электронами проводимости*, получившими такое название за то, что они переносят электрический ток. В этом случае имеет смысл говорить только о наиболее близких к ядру замкнутых оболочках, хотя и их структура претерпевает изменения из-за нахождения в кристалле. Электроны этих оболочек локализованы, т. е. находятся главным образом вблизи «своих» атомов.

Альтернатива описанной ситуации состоит в том, что внешние электроны не коллективизируются, но по своеобразным «мостикам» могут переходить от одного атома к соседнему. Такая ситуация соответствует диэлектрическим, полупроводниковым, ионным и молекулярным кристаллам.

Хотя приведенная картина носит очень приближенный, качественный характер, следует сказать, что в настоящее время не существует точной теории, которая позволяла бы во всех деталях описывать электронную структуру различных материалов.

Теперь вернемся к идеям Френкеля и Гейзенберга. Оба физика выдвинули идею о решающей роли обменного взаимодействия в возникновении ферромагнетизма. И все-таки их точки зрения существенно различались. Френкель считал, что решающая роль принадлежит обменному взаимодействию коллективизированных электронов, в то время как утверждение Гейзенберга относилось к электронам локализованным. По этой причине идеи Френкеля в большей степени соответствуют металлам, а модель Гейзенберга — диэлектрикам, хотя в основе и того, и другого подхода лежит обменное взаимодействие.

Первые же расчеты, проведенные по моделям Френкеля и Гейзенберга, показали, что ферромагнетизм, понимаемый как самопроизвольное намагниченное состояние системы электронов, следует из этих моделей. Что касается конкретных цифр, увы, с этим дело обстояло не слишком благополучно, так как модели были грубыми. Иными словами, они не учитывали многое из того, что нельзя было не учитывать. И все-таки сущность новых идей состояла, разумеется, не в ошибках. Рациональное зерно, заключавшееся в идее обменного взаимодействия, дало росток, и в дальнейшем эти модели были уточнены, так что и количествен-

ные результаты стали вполне приемлемыми.

Новым шагом в развитии теории магнетизма явилась теория, предложенная С. П. Шубиным и С. В. Вонсовским. Они выдвинули идею, что обменное взаимодействие может осуществляться также между коллективизированными электронами и локализованными. Эта модель оказалась очень плодотворной и позволила дать объяснение магнитным свойствам многих материалов, для которых модели Френкеля и Гейзенберга давали неточные или даже совсем неверные результаты.

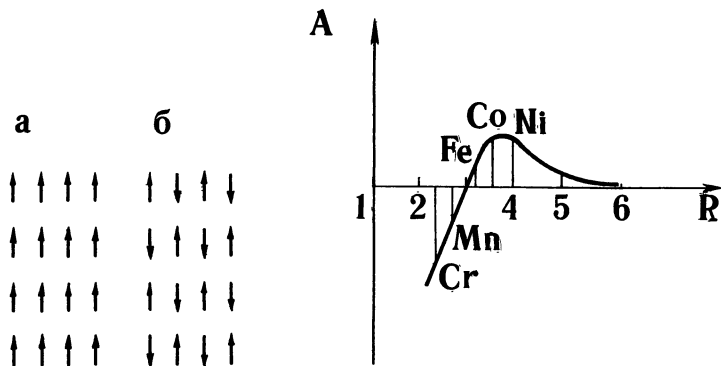
Три перечисленные модели и лежат в основе современной теории магнетизма. На самом деле эти модели просты только на первый взгляд. Для того чтобы с их помощью извлечь конкретные результаты, необходимо прибегнуть к квантовой механике, и тут сразу выяснится, что дело обстоит совсем не так просто. Тем не менее физикам удалось разработать много тонких и эффективных методов, позволяющих «обсчитывать» эти модели. Результатом расчетов являются предсказанные характеристики ферромагнитных материалов. Успехи, достигнутые на этом пути, значительны, однако, несмотря на все эти достижения, теория ферромагнитных материалов, например, не в состоянии указать, какие металлы ферромагнитны и какие неферромагнитны.

Модель Гейзенберга наиболее проста для понимания. Он исходил из того, что в каждом узле кристаллической решетки расположен спиновый магнитный момент, принадлежащий электрону, который находится на внешней оболочке, в то время как внутренние оболочки полностью заполнены. Такой атом «похож» на атом водорода и вот чем: вклад в его магнитный момент вносит этот единственный электрон. По этой причине модель Гейзенберга составлена из водородоподобных атомов. Атомы в решетке расположены достаточно близко, чтобы обменное взаимодействие внешних элект-

ронов было, по крайней мере у ближайших соседей по решетке, заметным. Но уже следующие за ними соседи — вторые — не вносят вклада в обменную энергию. Почему? Ведь все электроны неразличимы, вне зависимости от расположения в кристаллической решетке. Это действительно так, но мы уже говорили о том, что обменная энергия является функцией расстояния, причем она быстро убывает при удалении электронов друг от друга. Поэтому часто учитывается обмен только между ближайшими соседями по решетке. Такое приближение называется *приближением ближайших соседей*.

Основной результат Гейзенберга наряду с самой идеей о решающей роли обмена для возникновения спонтанного магнитного момента состоял в том, что ему удалось рассчитать значение обменной энергии. Однако оно оказалось таким, что предсказанный теорией ферромагнетизм должен иметь место при температурах выше точки Кюри, т. е. там, где ферромагнетизма как раз быть не должно.

Что касается знака, то он, вообще говоря, в теории Гейзенберга может быть любым. И так же, как в атоме водорода, отрицательная обменная энергия соответствует антипараллельному расположению магнитных моментов и, следовательно, отсутствию спонтанной намагниченности. Мысль о том, что существует магнитное упорядочение, в котором спины попарно направлены друг другу навстречу (рис. 1), была высказана в 1936 г. французским физиком Луи Неелем. Оказалось, что такие системы, названные *антиферромагнетиками*, встречаются даже чаще, чем ферромагнетики. Однако экспериментально обнаружить их не удавалось долгое время. Действительно, хотя упорядочение и существует, в магнитном смысле оно никак не проявляется — ведь, грубо говоря, антиферромагнетики не при-



Р и с. 1. Схемы расположения магнитных моментов в ферромагнетике (а) и антиферромагнетике (б).

Р и с. 2. Зависимость обменной энергии от отношения постоянной решетки к диаметру электронной «орбиты».

тягивают железо, они не магниты. Только в 50-е годы, когда были развиты тонкие методы исследования твердых тел, в частности методы нейтронного рассеяния, удалось выявить материалы, которые были надежно идентифицированы как антиферромагнетики. Из «чистых» элементов антиферромагнетиками являются марганец и хром. В класс антиферромагнетиков входят простейшие соединения типа оксидов, хлоридов, сульфидов, карбонатов, а также множество веществ с достаточно сложной структурой. Антиферромагнетизм, как и ферромагнетизм, существует лишь при низких температурах (понятие «низкий» зависит от конкретного материала). При нагревании до некоторой температуры антиферромагнитное упорядочение исчезает. Эта температура, аналогичная точке Кюри для ферромагнетиков, называется *точкой Нееля*. Вот к чему при-

водит отрицательная обменная энергия атомов в кристалле.

Если же она положительна, магнитные моменты выстраиваются параллельно (вспомним молекулу водорода), потому что такой порядок уменьшает энергию ферромагнетика.

Нельзя ли все-таки, хотя бы приближенно, рассчитать обменную энергию и выявить ее знак? Такой расчет был выполнен Гансом Бете (а после него и многими другими). На рис. 2 приведена зависимость обменного взаимодействия от расстояния между атомами, выраженного в некоторых безразмерных единицах. Там же отмечены расстояния, отвечающие некоторым из переходных элементов. На малых расстояниях обменная энергия отрицательна, и именно в эту область попадают хром и марганец — антиферромагнетики. Далее энергия становится положительной, растет, достигает максимума, после чего довольно быстро устремляется к нулю. Три «классических» ферромагнетика — железо, кобальт и никель — попадают в область максимума и характеризуются высокими значениями температуры Кюри (1040, 1400 и 630 К соответственно). Особый интерес представляет марганец. Хотя обменная энергия для него и отрицательна, она мала, и марганец «почти» попадает в ферромагнетики. Если бы в кристаллической решетке марганца удалось немного «отодвинуть» атомы друг от друга, энергия переменяла бы знак, и марганец, по нашим представлениям, должен был стать ферромагнетиком. Конечно, так просто атомы в решетке не раздвинешь, но достичь этого все-таки можно. Если добавить в чистый марганец некоторое количество примесных атомов азота, в среднем расстояния между атомами марганца несколько возрастут. Этого «несколько» оказывается достаточно для изменения знака обменной энергии.

Такой эксперимент был осуществлен. Обнаружилось, что марганец с примесями азота действительно приобретает ферромагнитные свойства. Аналогичная картина наблюдается в сплавах марганца с алюминием и медью (сплавы Гейслера), оловом, висмутом. В них атомы марганца отделены другими атомами, и эти сплавы также ферромагнитны.

Хотя антиферромагнетики вследствие скрытости своих магнитных свойств не находят практического применения, их изучение важно с точки зрения понимания магнитных явлений. Есть и еще одна причина, по которой магнитные «невидимки» вызывают интерес исследователей. Водородоподобная модель Гейзенберга приписывает каждому атому один-единственный магнитный момент «внешнего» электрона. Единицей магнитного момента является магнетон Бора. Модель моделью, а реальные магнитные материалы, разумеется, могут иметь в незаполненной оболочке и несколько электронов. И все они из-за обменного взаимодействия могут участвовать в образовании магнитного порядка. Рисунок, иллюстрирующий расположение спинов в ферро- и антиферромагнетиках,— не более чем схема. Нельзя забывать о том, что реальные магнетики — это прежде всего кристаллы, которые имеют объем и, следовательно, трехмерную кристаллическую решетку. И в конечном счете их магнитные свойства в немалой степени зависят от того, как именно магнитные атомы расположены в этой решетке. С «решеточной» точки зрения антиферромагнетик можно представить себе как совокупность двух подрешеток, которые вставлены одна в другую, а их моменты в точности скомпенсированы. Может случиться так, что магнитные моменты подрешеток не в точности равны, хотя и направлены навстречу друг другу. В результате такая система внешне будет проявлять ферромагнитные

свойства, хотя по существу она антиферромагнитная, и обменная энергия для нее будет отрицательной. Такие материалы называются *нескомпенсированными антиферромагнетиками*. Другое их название — *ферримагнетики*, или *ферриты*. Оно образовано по аналогии с ферромагнетиками, но происходит от названия соединения, состоящего из оксидов железа $\text{FeO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$, называемого ферритом наряду с некоторыми подобными соединениями, в которых атом железа в первом оксиде заменен двухвалентным металлом.

Спрашивается: если ферриты внешне ведут себя как ферромагнетики, например железо, то какая разница между ними? Не все ли равно, как их называть? Дело, конечно, не в названии. Мы говорили о магнитных свойствах этих материалов, но нельзя забывать о том, что они могут различаться другими качествами. Всем известно, что железо — это металл. Основное отличие металлов от прочих веществ — способность хорошо проводить электрический ток. С этой точки зрения ферриты — полупроводники. Их главное отличие от ферромагнитных металлов — низкая проводимость. Это свойство ферритов делает их незаменимыми в радиотехнике. Там, где необходимо создать большую индуктивность, в катушку вставляют магнитный стержень. В радиоприемниках и других подобных устройствах используются поля высокой частоты. Когда в таком поле оказывается магнит-металл, под влиянием поля электроны проводимости совершают хаотические движения, называемые *токами Фуко*. Результатом являются потери энергии, которые по самым различным причинам нежелательны. В отличие от металлов ферриты-полупроводники имеют ничтожное количество электронов, способных более или менее свободно передвигаться под влиянием внешнего поля, и потери на токи Фуко в них практически отсутствуют.

Итак, три вида сильного магнетизма возникают благодаря тому не очень сложному для понимания факту, что электроны неразличимы. Обменное взаимодействие, «появившееся на свет» после развития квантовомеханических представлений о свойствах микрочастиц, позволило проникнуть в вековую тайну магнита. Усилия тысяч исследователей разных времен и народов увенчались успехом. Разумеется, изучение связи микроструктуры с магнитными свойствами различных материалов продолжается. Хотя многое понято, многое еще предстоит понять.

ЗЕМЛЕВЛАДЕНИЕ В ЭПОХУ ФЕОДАЛИЗМА

Феодализм, сменивший в средние века в Европе рабовладельческий строй Римской империи, получил свое название от слова «феод», означающего земельный участок (который мог достигать иногда размеров небольшой страны), получаемый вассалом от сюзерена. Феодалы, или домены, были платой сюзерена за военную службу, которую несли феодалы-вассалы. Профессиональные воины, феодальные рыцари нередко использовали военную силу и для расширения своих доменов, однако сколько бы войн ни велось, феодальная раздробленность, заключавшаяся в том, что страны были разбиты на отдельные области — домены, долгое время была господствующей приметой государственного устройства. Хотя формально во главе феодальной иерархии стоял король или император, князья, герцоги и бароны не слишком серьезно относились к своим вассальным обязанностям по отношению к формальному главе государства и, случалось, восставали против него, а то и свергали с трона неугодного сюзерена.

Однако со временем феодальная разобщенность стала тормозом на пути экономического развития: ведь

каждый феодал устанавливал в своем домене собственные законы. Постепенно власть короля (или императора) усиливалась. В своем стремлении создать централизованное государство верховная власть, между прочим, использовала и феодальную раздробленность: она поддерживала феодалов, которые признавали власть короля, и выступала против тех, кто ее не признавал. Как известно из истории, стремление к централизации в конце концов возобладало над центробежными феодальными тенденциями, и все европейские государства — одни раньше, другие позже — стали едиными державами.

Образец магнитного материала напоминает феодальное государство, и прежде всего тем, что он разбит на *домены*. Результатом этой «феодальной раздробленности» является отсутствие самопроизвольной намагниченности у куска железа.

Позвольте,— можете возразить вы,— а обменная энергия? Ведь она, будучи положительной, приводит к тому, что магнитные моменты выстраиваются параллельно друг другу! И кусок железа должен иметь магнитный момент сам по себе, как говорят, спонтанно.

Физика — наука экспериментальная. Это означает, что как бы правильно вы ни рассуждали, результат вашего рассуждения нельзя признать верным, если он не подтверждается экспериментом. Эксперимент в физике — это суд последней инстанции, приговор которого обжалованию не подлежит (речь, конечно, идет о правильном эксперименте, проведенном без ошибок). Единственное, что может его опровергнуть,— это другой эксперимент, более тонкий или более сложный. Возьмите любую железную деталь, прошедшую термообработку (позже мы поймем, почему именно такую деталь), в процессе которой она нагревалась до температуры выше 1040 К (почему именно до этой температуры, мы

также поймем позже), и испытайте ее магнитные свойства. Вы легко убедитесь, что и следа их у такой детали нет!

Но ведь они должны быть! Или обменная теория магнетизма неверна?

Не будем спешить с категорическими выводами.

Обменная теория верна, хотя магнитных свойств железная деталь действительно не обнаруживает. Проведем еще один эксперимент. Поднесем к нашей «немагнитной» детали магнит и подержим его некоторое время в непосредственной близости. Если теперь снова устроить проверку, деталь также окажется магнитом! Откуда появились магнитные свойства?

Ответа на этот вопрос не существовало до 1904 г., когда П. Вейс (тот самый, который выдвинул теорию молекулярного поля), предположил, что всякое ферромагнитное тело, охлажденное ниже своей точки Кюри, разбивается на отдельные намагниченные области — домены. И хотя каждый домен обладает спонтанной намагниченностью, магнитные моменты отдельных доменов ориентированы так, что суммарный, магнитный момент всего тела равен нулю. Когда же ферромагнитное тело попадает в магнитное поле (если, например, к нему поднести магнит), то магнитные моменты доменов стремятся выстроиться вдоль поля, в результате чего у тела и появляется суммарный магнитный момент. Иначе говоря, ферромагнитное тело после пребывания в магнитном поле само становится магнитом. Причины, по которым магнитные моменты доменов выстраиваются вдоль приложенного поля, примерно те же, по которым магнитная стрелка уверенно показывает на север.

Гипотеза Вейса при всем своем остроумии и убедительности нуждалась в подтверждении. И такое подтверждение появилось. Прежде всего домены удалось увидеть. Для этого не потребовалось обладать каким-

либо сверхострым зрением. В 1931 г. Н. С. Акулов (впоследствии академик Академии наук Белорусской ССР) и одновременно с ним немецкий исследователь Ф. Биттер предложили метод, позволяющий визуально наблюдать области спонтанного намагничивания — домены, который получил название *метода порошковых фигур*.

Идея метода, пожалуй, не уступает в простоте и изяществе гипотезе Вейса. Известно, что маленькие намагниченные частички ферромагнитного материала притягиваются к полюсам магнитов. Если два магнита составить так, чтобы северный полюс одного примыкал к южному полюсу другого, то эти мелкие частички осядут как раз на границе южного и северного полюсов. Ход рассуждений Акулова был примерно таков: поскольку домены — это магниты, то, «посыпав» на них маленькие частицы ферромагнитного порошка, можно добиться того, что они осядут на границах доменов.

Хотя идея была довольно прозрачной, ее осуществление потребовало немалых усилий. Прежде всего пришлось уточнить содержание слова «посыпать». Попад на поверхность домена, твердая частица ферромагнетика будет испытывать воздействие по крайней мере двух сил: силы притяжения со стороны домена как магнита, которая толкает ее по направлению к магнитному полюсу, и силы трения о поверхность. Будет ли частица при этом двигаться по направлению к полюсу или же останется на том месте, куда ее «просыпали», зависит от соотношения двух сил — магнитной и силы трения. Нельзя ли устроить так, чтобы магнитные силы были заведомо больше? Поскольку магнитные силы заданы, то остается один путь — уменьшить силу трения. Как это делается, хорошо известно. Для ослабления трения применяется смазка. Именно так и поступил Акулов, взвесив мелкий ферромагнитный порошок в керосине.

Магнитная частица в жидкости гораздо подвижнее, чем на поверхности твердого тела. Другая сложность заключалась в том, что поверхность наугад выбранного образца всегда неровная. Даже если она кажется ровной, на ней имеется множество невидимых невооруженным глазом царапин, бугорков, ямок, словом, в некотором масштабе (достаточно не очень сильного микроскопа, чтобы перейти в этот масштаб) поверхность ферромагнетика выглядит, как поверхность Луны, которую вам, наверное, случилось видеть на фотографиях. Все эти «кратеры», «горы» и «хребты» на поверхности магнитного материала служат причиной неоднородности магнитного поля, создаваемого магнитом. Эти неоднородности, ничего общего не имеющие с границами доменов, являются дополнительными полюсами. Поскольку маленькие частички ферромагнетика, взвешенные в жидкости, не в состоянии различать природу неоднородности, то они так же охотно будут оседать на царапинах, ямках и бугорках, как и на границах доменов.

Выход один: сделать, насколько это возможно, поверхность магнитного материала гладкой. Можно было бы, например, ее отполировать. Вам, быть может, доводилось видеть, как делают гладкие поверхности: есть шлифовальные станки, которые с помощью специальных полировочных паст, куда включены очень мелкие и очень твердые частицы, могут сделать поверхность ровной, «как зеркало» (на самом деле куда ровнее любого зеркала). Подобная полировка для магнитного материала непригодна. Дело в том, что в процессе полировки поверхностный слой ферромагнетика деформируется, и в результате в этом слое образуется совершенно другая доменная структура, чем та, которая существует в этом материале, если его не полировать. Вот какой остроумный выход был найден: после того как

образец был отполирован механически и его поверхность стала достаточно ровной, верхний деформированный слой удалялся с помощью электролитического травления. Оно было организовано таким образом, что поверхность страивалась равномерно, так что гладкость и ровность, достигнутые при механической полировке, не нарушались. Такое травление получило название *электролитической полировки*.

Итак, поверхность отполирована, ферромагнитный порошок взвешен в жидкости.

Нальем жидкость на поверхность магнита. Подождем некоторое время и увидим, что мелкие ферромагнитные частички действительно оседают, образовав на поверхности *п о р о ш к о в ы е* фигуры. Порошковыми они названы потому, что образованы магнитным порошком. Какова же форма этих фигур?

Ответить на этот вопрос однозначно невозможно, потому что формы получаются различные для разных магнитных материалов и даже для одного и того же материала в зависимости от того, с каким кристаллографическим направлением совпадает полированная поверхность.

Что такое кристаллографическое направление, мы вскоре выясним. Что же касается формы порошковых фигур, то она отличалась большим разнообразием. Это могли быть полосы, небольших размеров пятна, примыкающие друг к другу треугольники, иглообразные фигуры и т. п. Догадка Вейса о наличии доменов была верной. Соседние домены, как феодальные владельцы Средневековья, соперничают друг с другом, поступая по принципу «наоборот»: если магнитный момент одного домена направлен «вверх», то магнитные моменты его соседей направлены «вниз». Ясно, что слова «вверх» и «вниз» можно без всякого ущерба заменить словами «вправо» и «влево», — смысл в том, что магнитные мо-

менты соседей направлены в противоположные стороны.

Что же происходит, когда разделенный на домены магнит попадает в магнитное поле?

Поле в этом случае можно сравнить с королем. Если «король» слабый — магнитное поле невелико, — значительных изменений не произойдет. Поскольку магнитные моменты доменов ориентированы по-разному, то какие-то из них оказываются направленными в ту же (или почти в ту же) сторону, что и магнитное поле, в то время как другие — против (или почти против) него. Но, подобно тому как даже слабый король принимал сторону тех, кто поддерживал его, так и магнитное поле «поддерживает» домены, магнитные моменты которых близки по направлению к его собственному. В результате «покорные» домены начинают поглощать своих «несогласных» собратьев, расширяя — но не слишком — собственные владения за счет «неправильных» соседей.

Увеличим поле. Процесс «поедания» доменов с антипараллельными полю магнитными моментами усиливается. Границы «правильных» доменов все расширяются. Это происходит до тех пор, пока не исчезнут все «мятежные» домены. На этом, казалось бы, можно закончить. Но нет. Ведь мы говорили, что остаются домены с намагниченностью, почти совпадающей с направлением поля. Если увеличивать поле дальше, слово «почти» придется убрать, потому что при некотором значении напряженности поля магнитные моменты всех без исключения доменов повернутся и выстроятся в точности параллельно магнитному полю. Ферромагнетик становится намагниченным до насыщения. Наступает, так сказать, абсолютная монархия. «Власть» поля настолько велика, что увеличить ее попросту невозможно. И действительно, дальнейшее увеличение поля не приводит к росту намагниченности.

Теперь нам примерно понятно, почему железо не имело магнитного момента и почему оно приобрело его после соприкосновения с магнитом. Существование доменов объясняет такое поведение.

Неясным осталось, пожалуй, вот что: почему существуют домены?

ЧЕМ ТОПЯТ ПЕЧЬ!

История развития человека и человеческого общества неразрывно связана с потреблением энергии. Начав с использования тягловой силы животных, люди последовательно движутся через эпохи пара, электричества, ядерной энергии. Мы стоим сейчас на пороге термоядерной эры, наступление которой позволит спасти от уничтожения миллиарды тонн органического топлива: угля, нефти, газа, древесины — и доставит практически неограниченные источники энергии. Потребление энергии в повседневном представлении неотделимо от топлива, однако не только топливо обладает энергией. В действительности ею обладают все без исключения тела на Земле. Это не значит, конечно, что печь можно топить железом. Печь топят дровами, углем, нефтепродуктами. Однако и та энергия, которую нельзя извлечь из материала, сжигая его в топке, также может служить полезным источником, правда, не тепла, а информации.

Из чего складывается энергия ферромагнетика?

Прежде чем ответить на этот вопрос, зададим себе другой: как ответ на вопрос об энергии ферромагнетика связан с его доменной структурой?

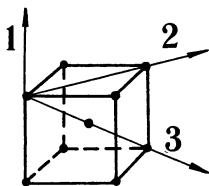
Мы, помним, что тело, находящееся в равновесии, пребывает в состоянии с наименьшей энергией. Это состояние отвечает наиболее устойчивому положению и раньше или позже, но всегда достигается изолированным телом — таким, которое не взаимодействует с окружением.

Логично предположить, что домены образуются потому, что их существование понижает энергию ферромагнетика, позволяя ему перейти в состояние с наименьшей энергией. Это рассуждение отчасти объясняет, для чего необходимо знать вид энергии ферромагнетика.

Вы помните, что, анализируя строение молекулы водорода, мы пренебрегли энергией взаимодействия магнитных моментов. Этих моментов было много: собственные и орбитальные моменты электронов и магнитные моменты ядер. Сделано это было потому, что в молекуле водорода присутствовали гораздо более мощные силы электрического взаимодействия, с которыми магнитные силы конкурировать не в состоянии. Однако то, что хорошо для молекулы водорода, не обязательно подходит для ферромагнитного кристалла. И в самом деле, как-то странно говорить об энергии тела, обладающего магнитными свойствами, не учитывая именно энергию магнитных взаимодействий. И здесь нам придется сказать несколько слов о кристалле.

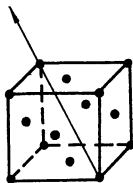
Первое и основное, что отличает кристалл от жидкости и газа,— это кристаллическая решетка. Атомы в идеальном кристалле расположены в строгом порядке. Если принять за отправную точку какой-нибудь атом, то, передвигаясь в трех фиксированных направлениях на определенные расстояния, называемые *периодами решетки*, мы будем встречать другие атомы в точках, называемых *узлами кристаллической решетки*. Такая периодичность в расположении атомов переносится и на физические свойства кристалла и называется *трансляционной инвариантностью*. Она означает неизменность свойств кристалла при переносе (трансляции) на расстояния, кратные периодам решетки.

Железо имеет кубическую объемно центрированную решетку (рис. 3). Восемь атомов расположены по вершинам куба и один — в его центре. Решетка никеля



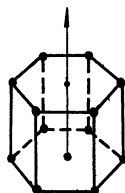
Fe

Р и с. 3. Главные кристаллографические направления объемно центрированной решетки железа.



Ni

Р и с. 4. Направления легкого намагничивания грациентрированной решетки никеля.



Co

Р и с. 5. Направление легкого намагничивания гексагональной структуры кобальта.

тоже кубическая, но грациентрированная (рис. 4). Помимо восьми атомов, в вершинах куба у никеля имеется по одному атому на каждой грани. У третьего классического ферромагнетика — кобальта — решетка гексагональная, похожая на пчелиные соты (рис. 5).

Определив, что такое идеальный кристалл, нужно добавить, чем он отличается от неидеального. Говоря о том, что атомы расположены в такой-то точке, мы берем на душу небольшой грех. И не только по той причине, что атомы подчиняются правилам квантовой механики и помещать их в точку не очень-то правильно. Дело еще и в том, что атомы в кристалле, который имеет температуру, отличную от нуля, обладают кинетической энергией. Кинетическая энергия, как вы знаете, связана со скоростью. Выходит, что атомы в кристалле находятся в движении, и так оно и есть: атомы не «сидят» на месте, в узлах, а непрерывно движутся около них. Что же мешает им покинуть свои узлы навсегда? Помимо кинетической энергии, у атомов есть

энергия потенциальная. Она складывается из энергии взаимодействия атома с другими атомами в решетке. Наиболее важная часть взаимодействия — это взаимодействие ближайших соседей (в решетке железа — атома в центре куба с атомами в его вершинах). На коротких расстояниях между атомами действуют силы отталкивания. Именно этим объясняется «нежелание» атома покидать «родной» узел. Ведь как только атом начинает удаляться от узла, он наталкивается на противодействие соседей и волеиневолей ему приходится возвращаться.

Другие отступления от идеальности кристалла связаны с тем, что не все узлы заполнены атомами. Более того, те же самые соображения устойчивости, связанные с минимальностью энергии, приводят, оказывается, к тому, что в кристалле должны быть пустые, не занятые атомами узлы. Такие узлы называются *вакансиями*. Есть множество других дефектов кристаллической решетки, но все-таки главное в ней — регулярность, а не отступления от нее, хотя эта регулярность всегда в той или иной мере бывает нарушена.

Коль скоро атомы в решетке могут находиться не в любых, а лишь в определенных местах (вы сами сделаете поправку к словам «определенное место»), естественно ожидать, что и свойства кристалла будут зависеть от направления. Зависимость свойств от направления называется *анизотропией* (газы и жидкости из-за отсутствия упорядоченности кристаллического типа *изотропны*, т. е. все их свойства одинаковы в любом направлении). На рис. 3 стрелками показаны три направления, которые называются *основными кристаллографическими направлениями*. Видно, что они совпадают с ребром куба, диагональю его боковой грани и диагональю самого куба. Кроме указанных, есть и другие кристаллографические направления. Что-

бы их получить, нужно пририсовать к нашему кубику хотя бы один соседний и построить его по аналогии.

Хотя основные кристаллографические направления присущи всем кристаллам, а не обязательно тем, которые обладают магнитными свойствами, в ферромагнетиках эти направления оказываются выделенными и в магнитном отношении. Если взять размагниченный ферромагнитный кристалл, например железа, поместить его в магнитное поле, которое плавно увеличивалось бы, и следить при этом за ростом намагниченности, то вот что обнаружилось бы: скорость роста намагниченности зависит от того, в каком направлении по отношению к основным кристаллографическим расположено магнитное поле. На рис. 6 приведены графики такой зависимости для железа, когда магнитное поле приложено в направлении ребра (кривая 1), диагонали боковой грани (кривая 2) и диагонали куба (кривая 3). Видно, что намагниченность быстрее всего растет, если поле направлено вдоль ребра куба, и медленнее всего, когда оно направлено вдоль его диагонали. В конце концов

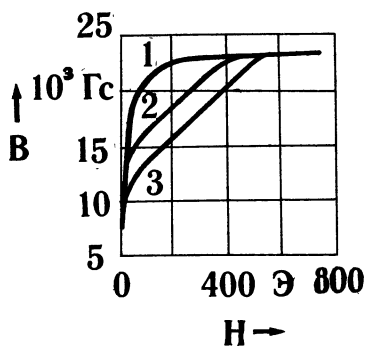


Рис. 6. Кривые намагничивания ферромагнитного кристалла железа вдоль главных кристаллографических направлений.

намагниченность достигает одного и того же значения вне зависимости от направления приложенного поля, однако для каждого направления (кристаллографического) значение напряженности поля, обеспечивающего насыщение намагниченности, свое. Направление, в котором насыщение достигается при наименьших значениях поля, называется *направлением легкого намагничивания*. Эти слова означают, что в любом другом направлении намагнитить ферромагнитный материал труднее. У железа три направления легкого намагничивания, которые соответствуют трем ребрам куба, исходящим из одной точки. В соответствии с этим железо называется магнито-трехосным ферромагнетиком. Никель — ферромагнетик магнито-четырёхосный, его оси проходят через противоположные вершины куба. Направление легкого намагничивания кобальта перпендикулярно к плоскости «пчелиных сот».

Итак, анизотропия магнитных свойств налицо. Чем же она обусловлена? Памятуя о том, какую роль играет в ферромагнетиках обменная энергия, естественно в первую очередь выяснить: не ею ли?

Простой анализ показывает, что это не так. Ведь обменная энергия по своей природе электростатическая, хотя она и вычисляется особым образом. А электростатическое взаимодействие не зависит от направления. Значит, причиной анизотропии служит какое-то другое взаимодействие.

И здесь самое время вспомнить, что, рассуждая о природе магнетизма, мы пришли к выводу, что в его основе лежат электрические силы. Магнитные же силы (собственно магнитную энергию) мы опустили, потому что они в тысячи раз меньше электрических.

Что же собой представляет магнитная энергия? Давайте возьмем в руки два магнита, имеющих форму прямоугольных брусьев, и соединим их одинаковыми

полюсами. Легко убедиться, что магниты в этом случае будут отталкиваться. Если соединить их разноименными полюсами, магниты будут притягиваться. Можно догадаться, что, поворачивая магнит из первого положения во второе, мы будем наблюдать изменение силы взаимодействия магнитов от отталкивания до притяжения. Другими словами, сила (а значит, и энергия) взаимодействия магнитов зависит от их *взаимной ориентации*.

В определенном смысле любые магнитные моменты (они называются еще и *магнитными диполями* — ведь у них два полюса) представляют собой маленькие магнитики. Это относится и к собственным, спиновым магнитным моментам электронов. Коль скоро энергия их взаимодействия зависит от ориентации, возникает естественный вопрос: как выстроятся диполи? Но разве мы уже не дали ответа на этот вопрос, анализируя обменную энергию? Если она положительна, дипольные моменты выстроятся параллельно друг другу, и поскольку речь сейчас идет о ферромагнетике, то именно так все и произойдет.

Сказанное верно, но заданный вопрос следует уточнить: обменное взаимодействие на самом деле выстроит диполи параллельно друг другу, но какую ориентацию эти параллельные моменты примут относительно решетки? Вот тут-то и оказывается, что их энергия существенно зависит от того, как диполи ориентируются относительно оси легкого намагничивания. Общее правило во всяком случае остается неизменным: моменты стремятся выстроиться так, чтобы их энергия была наименьшей. Какая энергия? Полная, т. е. вся. Именно по этой причине мы и взялись за выяснение того, из чего она складывается. Если бы атомы ферромагнетика обладали только спиновыми моментами, а сам ферромагнетик — одной-единственной осью легкого намагни

чивания, то минимальная энергия соответствовала бы расположению всех моментов вдоль этой оси.

Мы помним, однако, что в атоме есть и другие магнитные моменты, в частности связанные с орбитальным движением электрона. Эти орбитальные моменты взаимодействуют со спинами. Именно спин-орбитальное взаимодействие служит причиной, по которой даже в одноосном ферромагнетике магнитные диполи не могут выстроиться в точности в направлении оси легкого намагничивания. В результате ферромагнетик приобретает энергию, которая называется *энергией магнитной анизотропии*. Факт ее существования был установлен Н. С. Акуловым, который и сформулировал ее первую теорию. Это название обязано своим происхождением анизотропии магнитных свойств.

Какова ситуация в неодносных ферромагнетиках, например в железе? Примерно такая же, как и в одноосных, но из-за того, что имеются три оси, она, конечно, несколько усложняется. Интересно, что если бы диполи и выстроились в точности вдоль одной из осей легкого намагничивания, энергия магнитной анизотропии все равно не обратилась бы в нуль, так как магнитный момент не может быть одновременно параллелен трем взаимно перпендикулярным осям.

Чтобы не запутаться во множестве осей, далее будем рассматривать лишь одноосные ферромагнетики.

Итак, мы приняли точку зрения, что домены существуют. Не допускаем ли мы этим самым некоей логической ошибки? Ведь мы хотим доказать, что домены существуют, а вместо этого с самого начала допускаем их существование. Иначе говоря, предполагаем то, что хотим доказать.

Хотя формальное противоречие как будто налицо, никаких натяжек в нашем рассуждении нет. Давайте поставим задачу так: мы допускаем, что домены существ-

вуют, но при этом никак не предопределяем ни их форму, ни размеры. Другими словами, теория должна дать ответ на вопрос: каковы форма и размеры доменов? Отсутствие доменов при этом выражалось бы следующим образом: домен имеет бесконечные размеры, т. е. кристалл представляет собой один-единственный домен, в котором магнитные моменты всех без исключения атомов направлены одинаково.

Итак, имеются два соседних домена, магнитные моменты которых противоположно направлены. Чрезвычайно важно ответить на вопрос: как направлены моменты атомов, расположенных непосредственно на границе двух доменов? Каким принципом следует руководствоваться при выборе ответа? Вообще говоря, все тем же: минимальностью энергии взаимодействия двух доменов. Оказывается, что энергия взаимодействия будет меньше в том случае, если атомы, находящиеся в пограничной области, сменяют направление магнитных моментов не резко, как показано на рис. 7, а постепенно, «плавно» переменяют направление «вверх» на направление «вниз» (рис. 8).

Мы определили уже две составляющие энергии ферромагнетика, состоящего из доменов: энергию магнитной анизотропии и обменную энергию, но нас сейчас интересует первая из них. Если бы атомы на границе меняли направление магнитных моментов резко, а не плавно, то энергия магнитной анизотропии была бы равна нулю. Плавная же перемена направления приводит к появлению магнит-

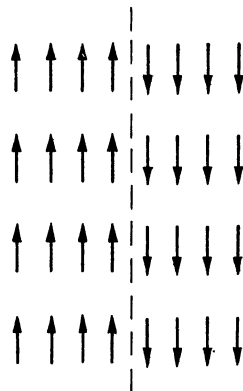


Рис. 7. Схема расположения магнитных моментов в двух соседних доменах.

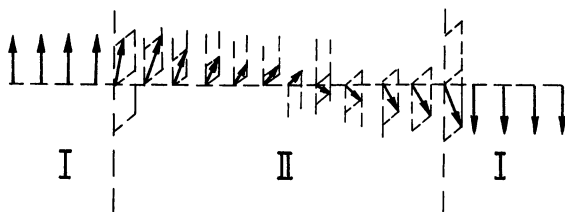


Рис. 8. Схематическое изображение структуры переходного слоя между доменами:

I — домен; *II* — переходный слой.

ных моментов, не параллельных оси легкого намагничивания, благодаря чему и возникает вклад в энергию, обязанный своим происхождением неоднородному распределению моментов на границе двух доменов.

Еще один вклад в энергию ферромагнетика обусловлен конечностью размеров ферромагнитного кристалла и связан с существованием кристаллической поверхности.

И в самом деле, в реальном мире не существуют бесконечные кристаллы, хотя и встречаются очень большие. Значительная часть кристаллических свойств не зависит от размеров кристалла. Кристаллическая поверхность — как прибрежная полоса в океане: ее размеры чрезвычайно малы по сравнению с размерами океана, а вряд ли кому-нибудь придет в голову мысль, что свойства океана определяются прибрежной полосой. Правда, атом, расположенный на поверхности, находится в «привилегированном» положении по сравнению со своими собратьями, находящимися в «глубинке». Для него кристаллическая решетка имеется лишь с одной стороны. Какое же соседство у него со стороны поверхности? Это зависит от того, в каких условиях находится кристалл. Если он помещен в вакуум, то с внешней стороны у граничного атома вообще

нет никаких соседей. Если кристалл находится в контакте с газом того же вещества, из которого состоит сам, то с внешней стороны у него могут быть или не быть соседями подобные атомы: ведь плотность газа намного меньше плотности твердого тела. «Газовые» соседи могут появляться и исчезать, ведь атомы газа совершают непрерывное движение, в отличие от кристалла не привязанное к узлу. Таким образом, граничные атомы находятся не в тех же условиях, что атомы в глубине решетки. Эта особенность сказывается и на поведении атомов поверхности: они колеблются не так, как атомы внутри объема. Второй от поверхности слой атомов находится уже почти в «регулярных» условиях: в численном отношении окружение атомов, прилегающих к поверхности, такое же, как и глубинных; правда, соседи с внешней стороны не вполне такие, как с внутренней, но это различие приводит уже к значительно меньшим особенностям поведения атомов второго ряда. Быстро затухая, эффекты поверхности проявляются лишь на небольшом расстоянии от нее: как правило, в нескольких атомных слоях, и именно поэтому их влиянием можно в большинстве случаев пренебречь.

И все-таки встречаются физические ситуации, в которых влияние поверхности является очень важным и даже определяющим. Все предыдущие рассуждения понадобились нам для того, чтобы понять, что поверхность действительно вносит некоторые особенности в свойства кристалла.

Возвращаясь к кристаллу ферромагнитному, сузим прежде всего нашу задачу. Пусть кристалл имеет форму прямоугольного параллелепипеда. Именно такую задачу рассмотрели в 1935 г. советские физики Л. Ландау и Е. Лифшиц. Почему параллелепипеда? На самом деле можно было выбрать тело любой формы, но параллелепипед представляет собой более простую модель,

лучше «подходящую» к одноосному ферромагнетику. Размеры его указаны на рис. 9, а вертикальное направление совпадает с осью легкого намагничивания. Ландау и Лифшиц утверждали, что в магнитном отношении такой кристалл состоит из доменов, представляющих собой плоские слои, а вблизи поверхности образуются особые домены призматической формы.

Часть их рассуждений (разумеется, приблизительно: ведь мы обходились в отличие от Ландау и Лифшица без математики) мы уже воспроизвели, рассматривая структуру переходного слоя между соседними доменами. Обратимся теперь к рассмотрению поверхности.

Магнитное поле, создаваемое ферромагнетиком, должно удовлетворять уравнениям Максвелла. Ландау и Лифшиц показали, что если ферромагнетик разбит на домены, то требования, предъявляемые к магнитному полю вблизи поверхности уравнениями Максвелла, мо-

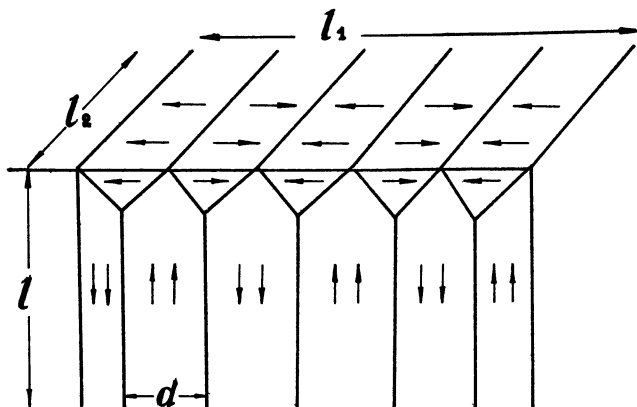


Рис. 9. Доменная структура ферромагнетика по Ландау и Лифшицу.

гут быть удовлетворены, если картину в поверхностном слое дополнить призматическими доменами, как изображено на рис. 9. Теперь остается ответить на один вопрос: какова толщина этих плоских слоев? И здесь снова приходит на помощь принцип минимальности полной энергии кристалла. В нашем случае она состоит, грубо говоря, из двух слагаемых: энергии, связанной с поверхностью (ведь магнитная структура у поверхности иная, чем в глубине кристалла), и энергии, связанной с плавным переходом направления магнитных моментов в областях между плоскими доменами.

Поверхностная энергия будет складываться из энергии призматических доменов. Если толщина слоя d (ее мы и хотим определить), то объем призматического домена равен $d^2 l_2 / 4$ (это четвертая часть прямоугольной призмы). Всего имеется l_1 / d таких призматических доменов на «верхней» и «нижней» гранях кристалла. Поверхностная энергия пропорциональна объему этих доменов. Подчеркнем, что она в сущности является энергией магнитной анизотропии: ведь в призматических доменах магнитные моменты перпендикулярны к оси легкого намагничивания. Итак, поверхностная энергия может быть записана в виде

$$E_s = A d l_1 l_2,$$

где A — некоторый коэффициент пропорциональности.

Обратимся теперь к вычислению энергии плоских доменов. Мы помним, что она связана с неоднородным распределением магнитных моментов на границе доменов. Нетрудно догадаться, что эта энергия пропорциональна площади боковой поверхности плоского домена, которая равна $l l_2$, а поскольку всего доменов l_1 / d , то эта внутренняя энергия (не связанная с поверхностью кристалла)

$$E_i = B l l_1 l_2 / d,$$

где B — другой коэффициент пропорциональности.

Теперь можно математически сформулировать задачу о нахождении толщины плоского домена: она должна быть такой, чтобы полная энергия кристалла

$$E = Adl_1l_2 + Bl_1l_2/d$$

имела наименьшее значение.

В том, что такой минимум существует, легко убедиться, проанализировав оба слагаемых, определяющих полную энергию. Допуская, что коэффициенты пропорциональности положительны (так оно, в действительности, и есть; более того, Ландау и Лифшиц определили эти коэффициенты через физические параметры ферромагнитного кристалла, но мы здесь не будем вдаваться в такие подробности), можно убедиться, что поверхностная энергия линейно растет с увеличением толщины слоя, а внутренняя энергия убывает обратно пропорционально этой величине. Тот, кто владеет дифференциальным исчислением или хотя бы умеет анализировать функции с помощью производных, знает, что минимуму соответствует равенство нулю первой производной, в то время как в точке минимума вторая производная должна быть положительной. Так или иначе, а ответ таков:

$$d = \sqrt{\frac{B}{A}} l,$$

т. е. толщина плоского слоя, в котором намагниченность сохраняет постоянное направление (за исключением узкой области на границе), пропорциональна корню квадратному из размера кристалла в направлении, перпендикулярном к этим плоским слоям.

Итак, домены существуют, и существование их связано с наличием у кристалла поверхности. Действительно, не будь поверхности, не было бы и соответствующего вклада в полную энергию кристалла, которая состояла бы только из одного слагаемого — внутренней энергии,

обратно пропорциональной толщине слоя. Но в этом случае наименьшее значение энергии достигалось бы при бесконечной толщине слоя, иначе говоря, в отсутствие поверхности весь кристалл представлял бы единственный домен и магнитные моменты всех атомов были бы направлены одинаково.

Вот каково может быть влияние поверхности: в количественном отношении оно вроде бы и невелико, но определяет в конечном счете магнитную структуру кристалла.

В нашем рассуждении есть, пожалуй, одно не очень понятное место. Почему, собственно говоря, мы (а вернее, Ландау и Лифшиц) выбрали именно такую форму доменов — плоские слои, а не какую-нибудь иную?

Нам, разумеется, неизвестен путь, которым они пришли к такому выбору. Но в физике, как и в других науках, важно не только догадаться, что дело обстоит так, а не иначе, но и обосновать правильность догадки. Ландау и Лифшиц сумели доказать, что такая форма доменов действительно обеспечивает минимальность энергии кристалла, и определили толщину доменов, выразив ее через другие параметры.

Здесь уместно упомянуть о том, что к моменту, когда появился расчет Ландау и Лифшица, другие исследователи также предпринимали попытки обосновать доменную структуру ферромагнетиков. В частности, упоминавшийся уже В. Гейзенберг и другой немецкий физик Ф. Блох, используя соображения, близкие к тем, которые применили Ландау и Лифшиц, показали, что доменная структура действительно является предпочтительной по сравнению со случаем однородного ферромагнетика, однако предсказанная ими форма доменов была иной: по их мнению, домены должны были иметь нитеобразную форму, а не плоскую, как это следует из результатов Ландау и Лифшица.

Расчет энергий этих двух конкурирующих структур показал, что модель с плоскими слоями обладает несколько меньшей энергией (при прочих равных условиях), чем модель с нитевидными доменами. И хотя разница невелика (энергии относятся как 4/3), можно было с уверенностью сказать, что в реальном одноосном кристалле должна реализоваться структура с меньшей энергией; она, как говорят, энергетически более выгодна.

Ну и, наконец, как всегда в физике, последнее слово оставалось за высшим судьей — Его Величеством Экспериментом.

Когда был изготовлен образец одноосного ферромагнетика в форме параллелепипеда, причем направление оси легкого намагничивания совпадало с одним из его ребер, что соответствовало модели Ландау и Лифшица, и этот образец был подвергнут электролитической полировке, когда были получены порошковые фигуры, выявившие границы доменов, оказалось, что эти порошковые фигуры в точности повторяют картину доменной структуры, предсказанную Ландау и Лифшицем. Совпадение поразительное! И хотя есть фотографии этих порошковых фигур, воспроизводить здесь их имеет мало смысла, настолько точно они повторяют границы, полученные чисто теоретическим путем.

Успех модели был налицо. Однако модель, как мы помним, учитывает ограниченное число факторов из действующих в реальной ситуации. Существуют ли физические системы, для которых модель Ландау и Лифшица неверна или не вполне правильна? Оказалось, что существуют.

При очень больших толщинах кристаллов более выгодной оказывается нитеобразная доменная структура. И хотя из упомянутых моделей это не следует, эксперимент подтверждает, что дело обстоит именно

так. Модели нуждаются в уточнении — необходимо учесть дополнительные факторы: ведь в тех рассуждениях, которые приводились выше, учитывалась только магнитная энергия, а кристалл обладает запасами и других видов энергии. Что же касается принципа минимальной энергии, то ведь он справедлив — подчеркнем это еще раз — для полной энергии кристалла, а не для какой-то отдельной ее составляющей.

Есть еще один случай, когда наблюдается отступление от доменных структур, упомянутых выше. Если последовательно уменьшать размер ферромагнитного кристалла, то он может сравняться с равновесным размером домена. В этом случае роль поверхности возрастает; она может вносить в энергию ферромагнетика больший вклад, чем, так сказать, объемная часть. Тогда деление кристалла на домены становится энергетически невыгодным: оно не понижало бы, а повышало энергию ферромагнетика. В результате образуются однодоменные частицы. Такое явление называется *суперпарамагнетизмом*. Например, частицы железного порошка однодоменны, если их размеры составляют примерно $0,78 \cdot 10^{-8}$ м.

Любопытен также вопрос о том, что произойдет, если уменьшать размер ферромагнитного кристалла ниже того предела, который требуется для установления однодоменного состояния. Здесь вступает в дело квантовая механика. Как было показано С. В. Вонсовским, при очень малых размерах ферромагнитной частицы говорит свое веское слово принцип неопределенности. Электрон начинает как бы «чувствовать», пользуясь выражением Вонсовского, границы частицы, в которой он находится. Согласно принципу неопределенности, попытка локализовать электрон, т. е. поместить его в малую область пространства размером δ_0 , приводит к неопределенности его импульса, которую

можно вычислить по формуле $\Delta p \approx \frac{\hbar}{\delta_0}$. Эта неопределенность импульса связана с кинетической энергией следующим образом:

$$\Delta \Sigma = \frac{(\Delta p)^2}{2m} = \frac{\hbar^2}{2m\delta_0^2}.$$

Если эта энергия сравнивается с обменной энергией, то она будет играть по отношению к магнитному упорядочению ту же роль, что и обычная тепловая энергия выше точки Кюри, и ферромагнитное состояние вообще станет невыгодным. По оценке Вонсовского, размер таких неферромагнитных частиц для типичных ферромагнитных материалов, у которых точки Кюри находятся в интервале 500—1000 К, составляет примерно 100 нм. Эксперимент подтверждает эти значения.

Вот сколько выводов относительно структуры ферромагнитных кристаллов можно сделать, используя утверждение о том, что в равновесии энергия кристалла должна быть минимальной. Следовательно, утверждение о том, что некоторая физическая система находится в равновесии,— это не просто слова. Этому утверждению соответствует физический принцип, подкрепленный в свою очередь математическим аппаратом; и все это вместе взятое позволяет извлекать информацию о свойствах физической системы.

Такова мощь методов теоретической физики.

СЛОВО И ДЕЛО

До сих пор, явно этого не высказывая, мы стояли на точке зрения физика-теоретика. Ссылаясь на некоторое (небольшое) число экспериментальных фактов, мы старались, следуя, разумеется, известным теоретическим построениям, понять, почему эти эксперименталь-

ные факты таковы, каковы они есть. Вопрос о том, откуда берутся эти факты, мы неявно выносили «за скобки». Экспериментальные факты берутся из экспериментов — это, кажется, достаточно очевидно.

Давайте изменим точку зрения и станем на некоторое время физиками-экспериментаторами. Правда, все эксперименты нам придется выполнять мысленно, так сказать, теоретически, но в этом ничего порочного нет — на самом деле все эксперименты, о которых пойдет речь, действительно проводились, так что достоверность наших мысленных действий будет покоиться на твердой экспериментальной почве.

Теоретик имеет дело с моделями, которые он формирует по своему усмотрению, хотя и с оглядкой на эксперимент. Модели битком набиты различными понятиями: собственными и орбитальными моментами электронов, разными видами энергии — от обменной до энергии магнитной анизотропии.

Положение экспериментатора в каком-то смысле «проще»: он имеет дело непосредственно с ферромагнитным кристаллом. Эта «простота», однако, с лихвой перекрывается теми сложностями, которые выдвигают перед экспериментаторами измерительные методы и аппаратура.

Перед нами образец ферромагнитного кристалла. Приступим к его исследованию. Прежде всего нам понадобится магнитное поле. Мы уже вели речь о том, что магнитное поле — это такая же реальность, как и «обычные» виды материи, но нам нужно не любое, а совершенно определенное, постоянное магнитное поле. Чтобы его получить, нужен источник магнитного поля.

Самый простой по устройству источник — постоянные магниты. Это образцы ферромагнетиков, которые обладают постоянным магнитным моментом. Мы уже

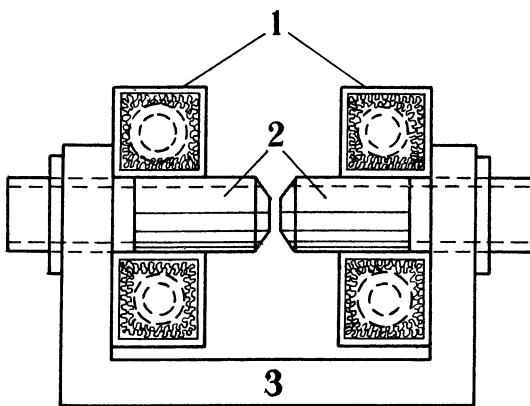
знаем, что если поместить ферромагнитный кристалл во внешнее магнитное поле, то домены в нем ликвидируются и его намагниченность становится однородной; именно так и «готовят» постоянные магниты. Их достоинством является простота эксплуатации, ведь постоянные магниты не требуют забот: они, так сказать, «задаром» создают магнитное поле. Их недостаток — невозможность изменять значение напряженности поля.

С этой точки зрения более эффективным источником являются соленоиды — катушки, на которые намотан провод. Через провод идет ток; петля с током, как известно, является маленьким магнитом. Катушка — это не что иное, как множество петель с током. Магнитные поля отдельных петелек-витков складываются, в результате чего можно получить довольно значительное магнитное поле, напряженность которого может достигать двух-трех сотен эрстед (эрстед — единица напряженности магнитного поля). Поле в соленоиде (а под этим полем подразумевается поле внутри катушки) близко к однородному, но на краях катушки напряженность поля уменьшается. Чтобы этого избежать, на концы соленоида наматывают дополнительные витки провода, что позволяет скомпенсировать ослабление напряженности на краях. Напряженность магнитного поля в соленоиде пропорциональна проходящему через него электрическому току и приближенно выражается формулой

$$H = \frac{N}{l} i,$$

где i — ток, А; l — длина соленоида, м; N — число витков. Формула, казалось бы, указывает на неограниченные возможности увеличения напряженности поля. Достаточно, скажем, увеличивать ток, пропускае-

мый через катушку. Ток, действительно, можно увеличивать, но что при этом произойдет с проводом? К сожалению, всякий провод может пропускать ток лишь ограниченной силы. На этом принципе как раз основана работа предохранителей в электрических цепях: когда сила тока достигает некоторого предельно допустимого значения, зависящего от материала, из которого изготовлен провод, и его сечения, выделяющейся в нем теплоты оказывается достаточно, чтобы проводник нагрелся до температуры плавления материала, и предохранитель плавится, предотвращая тем самым возникновение недопустимо большого тока в цепи,



Р и с. 10. Схема электромагнита.

опасного для более ценных элементов. Эта же совокупность обстоятельств ограничивает допустимый ток в соленоиде, а вместе с ним и напряженность магнитного поля, которую удастся реализовать с его помощью.

Ситуация, однако, не такая безнадежная, как может показаться. Теплоту, выделяющуюся в соленоиде, мож-

но отводить. Именно так и поступают. В результате в соленоидах с водяным охлаждением можно получать поля напряженностью до нескольких тысяч эрстед. Чтобы получать поля большей напряженности таким же способом, на охлаждение приходится затрачивать значительную энергию. По этой причине поля больших значений получают иначе — с помощью электромагнитов.

Электромагнит, схема которого представлена на рис. 10, состоит из железного ярма 3 (по форме действительно напоминает ярмо, которое надевают на волов), сердечников 2 (это просто ферромагнитные стержни) и катушек 1, которые, собственно говоря, и служат источником поля (точнее, ток, который проходит через катушки). Из-за известных уже нам свойств ферромагнетиков (для определенности будем считать, что сердечники тоже железные), когда через катушки идет ток, его магнитное поле — даже если оно не очень велико — создает в железе сердечников магнитное упорядочение, и в результате в воздушном зазоре между сердечниками возникает значительное магнитное поле напряженностью порядка десятков тысяч эрстед ($1 \text{ Э} = 79,577 \text{ А/м}$).

Электромагниты находят самое широкое применение не только в физическом эксперименте, но и в технике, в частности в системах автоматики, где они используются в качестве составных элементов реле.

Еще один способ получения сильных магнитных полей связан с очень низкими температурами. При глубоком охлаждении (до температур 10—20 К) многие металлы обнаруживают существенное понижение сопротивления. Например, у меди при температуре кипения жидкого водорода (20,4 К) понижается удельное электросопротивление по сравнению с комнатной температурой в тысячу раз. Примерно так же уменьшается

и мощность, выделяемая в катушках. Таким способом удавалось получать поля до ста тысяч эрстед.

Очень интересным источником магнитных полей являются сверхпроводники, электрическое сопротивление которых при температуре ниже определенной точки равно нулю. Ток, циркулирующий в сверхпроводнике без потерь, служит источником магнитного поля.

Большие успехи (в отношении значения напряженности поля) достигнуты в импульсных источниках поля, которые существуют лишь короткие промежутки времени, как правило, доли секунды. Пионером исследований импульсных источников выступил лауреат Ленинской и Нобелевской премий академик П. Л. Капица. В середине 20-х годов (тогда он еще не был ни лауреатом, ни академиком и работал в лаборатории знаменитого Резерфорда) Капица высказал идею, что при получении магнитных полей в течение очень короткого времени даже при очень большой мощности в обмотке катушки выделится не слишком большая энергия и, следовательно, катушка не успеет разогреться выше допустимого предела. Мощность — это энергия в единицу времени, и если известна предельная энергия, которая может выделиться в катушке, не расплавив ее (мы считаем, что теплота не успевает уйти из катушки), то, увеличивая мощность и сокращая время в одинаковое число раз, можно не превысить предельную энергию.

Хотя идея Капицы была несложной, ее реализация потребовала немалой изобретательности, причем основной проблемой оказалось получение больших мощностей. Он установил, что для импульсных полей длительностью порядка одной сотой секунды наиболее удачным источником энергии являются динамомашины со специально сконструированной обмоткой, обладающей малым внутренним сопротивлением. Эта установка получила название *ударного генератора*. Якорь

такого генератора раскручивался мотором при разомкнутой цепи, а когда он достигал требуемой скорости вращения, цепь, в которую была включена и катушка, замыкалась, и через нее в течение короткого времени шел большой ток. Таким способом Капица получал поля до 300 000 Э.

С того времени экспериментальная техника значительно усовершенствовалась, были изобретены и созданы новые электротехнические материалы. Теперь в качестве источников энергии используются конденсаторные накопители-батареи, способные в течение микросекунд выделять огромную энергию (сотни килоджоулей). В результате удастся получать напряженности магнитных полей в миллионы эрстед.

Так обстоит дело с источниками магнитного поля.

Но начинать эксперимент еще рано. Нам понадобится измерительная аппаратура, которая позволила бы контролировать различные величины, связанные с поведением ферромагнетика во внешнем магнитном поле. Что это за величины? В первую очередь, само магнитное поле, его напряженность.

Прежде чем измерять какую-либо физическую величину, неплохо понять ее физический смысл (это неплохо и в тех случаях, когда ее измерять не надо). Одна из возможностей пояснить смысл напряженности магнитного поля состоит в том, чтобы указать воздействие поля на движущийся электрический заряд. Мы уже говорили о том, что если скорость заряда \mathbf{v} , а величина его q , то сила, действующая на заряженную частицу, пропорциональна векторному произведению скорости заряда на напряженность магнитного поля:

$$\mathbf{F} = q\mathbf{v} \times \mathbf{H}.$$

Согласно правилам, вектор (в нашем случае сила), являющийся векторным произведением двух векторов (скорости и напряженности), перпендикулярен к ним.

Таким образом, магнитная сила всегда направлена перпендикулярно к скорости заряженной частицы.

Две другие величины, с помощью которых описывается процесс намагничивания,— это вектор намагниченности **М**, или просто намагниченность, и магнитная индукция **В** (это тоже вектор). Что они собой представляют? Для ответа на этот вопрос нам снова придется вернуться «внутрь» ферромагнетика (все дальнейшие рассуждения верны и для неферромагнетиков, но ферромагнетики для нас наиболее интересны). Мы знаем, что каждый магнитный момент создает вокруг себя магнитное поле. Если бы мы имели возможность, уменьшившись до размера атома, действительно проникнуть внутрь ферромагнетика и захватили бы с собой еще меньший приборчик для измерения напряженности магнитного поля, то мы обнаружили бы, что поле меняется очень быстро на малых расстояниях. Причина этого ясна: ведь в кристалле полно магнитных моментов разного происхождения. Приближаясь к ним, мы заметили бы увеличение напряженности магнитного поля, удаляясь,— падение. Давайте мысленно выделим в ферромагнитном кристалле небольшой объем, причем слово «небольшой» следует понимать так: он мал по сравнению с полным объемом кристалла, но будет содержать достаточно много атомов (порядка числа Авогадро, т. е. $6,022 \cdot 10^{23}$ частиц). Если интересоваться сейчас только полем, которое создает выделенный объем, то можно заметить, что это поле уже не будет претерпевать резких изменений: поля магнитных моментов отдельных атомов будут суммироваться, создавая в результате плавное изменение поля, которое называется *средним*.

Что произойдет, когда ферромагнетик (или любой другой магнитный материал) попадет во внешнее магнитное поле **Н**, например в поле, созданное в воз-

душном зазоре электромагнита? В результате он приобретет магнитный момент (это и будет намагниченность), который пропорционален приложенному внешнему магнитному полю:

$$\mathbf{M} = \chi \mathbf{H}.$$

Величина χ называется *магнитной восприимчивостью* и зависит от величины приложенного поля.

Ясно, что возникающий в результате воздействия внешнего магнитного поля \mathbf{H} магнитный момент \mathbf{M} сам создает магнитное поле. Ясно также, что оба поля складываются. Их сумма называется *магнитной индукцией* и обозначается \mathbf{B} , т. е.

$$\mathbf{B} = \mathbf{H} + 4\pi \mathbf{M}.$$

В дальнейшем мы будем называть эту величину просто индукцией. Если использовать теперь связь намагниченности с полем, то можно выразить индукцию через восприимчивость и внешнее поле:

$$\mathbf{B} = (1 + 4\pi\chi) \mathbf{H}.$$

Величину, стоящую в круглых скобках, называют *магнитной проницаемостью* и обозначают μ :

$$\mu = 1 + 4\pi\chi.$$

С ее помощью связь между \mathbf{B} и \mathbf{H} можно записать так:

$$\mathbf{B} = \mu \mathbf{H}.$$

Здесь необходимо сделать одну оговорку относительно системы единиц, в которых измеряются указанные три величины. В так называемой *гауссовой*, или *абсолютной*, системе единиц поле \mathbf{H} измеряется в эрстедах, и поскольку величины μ и χ безразмерны, то из приведенных формул следует, что единицы намагниченности \mathbf{M} и магнитной индукции \mathbf{B} должны быть те

же, что и напряженности магнитного поля **H**. Тем не менее **M** и **B** измеряют в гауссах, хотя это действительно те же самые единицы. Понятно, что люди, которые ввели два разных наименования одних и тех же единиц, руководствовались уважением к памяти двух выдающихся исследователей, внесших огромный вклад в изучение электромагнитных явлений,— Эрстеда и Гаусса, имена которых и увековечены в названиях упомянутых единиц. Надо сказать, что никакой особой путаницы в результате этого двойного наименования не возникает, и все, кто занимается физическими исследованиями магнитных явлений, давно к этому привыкли. Так и получилось, что во многих книгах (в том числе и в нашей) можно найти зависимость **B** в гауссах от **H** в эрстедах, хотя это одна и та же единица.

Необходимость международной унификации физических единиц ощущалась с давних пор. После широкого предварительного обсуждения в октябре 1960 г. XI Генеральная конференция по мерам и весам окончательно приняла новую систему и присвоила ей наименование «Международная система единиц» с сокращенным обозначением SI (СИ). В этой системе индукция **B** измеряется в единицах Вб/м² (Вб означает вебер, по имени немецкого физика Вильгельма Эдуарда Вебера), названных теслой по имени сербского ученого Н. Теслы. В СИ единица намагниченности та же, что и напряженности магнитного поля **H** (А/м). Если вы собираетесь проектировать устройства, содержащие источники магнитного поля, то вам будут полезны следующие соотношения:

$$\begin{aligned} B \text{ (гаусс)} &= 10^{-4} B \text{ (тесла)}; \\ H \text{ (гаусс)} &= H \text{ (эрстед)} = 79,577 H \text{ (А/м)}; \\ M \text{ (гаусс)} &= 10^3 M \text{ (А/м)}. \end{aligned}$$

В СИ иначе выглядит и связь между индукцией, полем и намагниченностью:

$$\mathbf{B} = \mu_0 (\mathbf{H} + \mathbf{M}).$$

Хотя мы использовали здесь для их обозначения те же буквы, что и в гауссовой системе, на самом деле это совсем другие величины, поэтому они и измеряются в других единицах. Величина μ_0 , появившаяся в уравнении, называется *магнитной проницаемостью вакуума* или *магнитной постоянной*. Она равна $4 \cdot 10^{-7}$ Гн/м (Гн означает генри, по имени американского физика Джорджа Генри).

Можно сказать, что недостатка в единицах магнитных величин не испытывается. Скорее, их некоторый избыток. В разных книгах и справочниках по магнетизму используются разные единицы, поэтому минимальное требование к читателю таких книг — быть осторожным и внимательным. Ведь численные значения одних и тех же величин в разных системах единиц могут различаться на многие порядки!

Вернемся теперь к нашим величинам, которые будем в дальнейшем измерять в зависимости от удобства в гауссовой системе или в СИ (как видите, путаница может быть и удобной).

В самом начале нашего рассказа мы говорили о диамагнетиках и парамагнетиках. В терминах восприимчивости или проницаемости различие между ними выглядит так. Диамагнетики, как мы помним, — это те вещества, которые ослабляют поле; восприимчивость для них отрицательна, а проницаемость меньше единицы. В результате вектор намагниченности оказывается направленным против вектора приложенного поля, а индукция меньше, чем напряженность этого поля. Для парамагнетиков восприимчивость положительна, а проницаемость больше единицы. В этом случае намагни-

ченность совпадает по направлению с приложенным полем, а индукция больше, чем напряженность этого поля.

Типичные значения восприимчивости для диамагнетиков — порядка 10^{-6} (они отрицательны!). Для парамагнетиков, за исключением, разумеется, ферромагнетиков, которые по этой классификации следует отнести к парамагнетикам, восприимчивость обычно намного меньше единицы и может составлять в зависимости от конкретного вещества сотые доли единицы и меньше. Разумеется, она положительна.

Две величины, характеризующие поведение магнитных материалов в магнитном поле, — восприимчивость и проницаемость — связаны между собой простым линейным соотношением. Для слабых магнетиков — диа- и парамагнетиков — более удобно пользоваться восприимчивостью, ибо проницаемость чрезвычайно близка к единице. Что касается ферромагнетиков, то для них в зависимости от удобства используются обе величины.

Теперь мы лучше представляем себе, какие именно величины нужно измерять и какой смысл они имеют. И все-таки начинать измерения, хотя бы и мысленные, еще рановато.

Слова о большей простоте работы экспериментатора по сравнению с трудом теоретика носят, конечно, шуточный характер. Всякая работа сопряжена с трудностями, и друг от друга разные виды деятельности отличаются различными наборами препятствий, которые приходится преодолевать. Конечно, разделение физических исследований на теоретические и экспериментальные в значительной мере условно. Ведь всякая физическая теория опирается на эксперимент, а эксперимент немислим без какой-либо физической теории.

Как два крыла птицы, теория и эксперимент обеспечивают плодотворный «полет» науки.

Одна из ловушек, подкарауливающих исследователя, который изучает поведение ферромагнетика во внешнем магнитном поле,— это так называемое «размагничивающее» поле.

Допустим, что у нас есть немагнитный образец ферромагнитного материала, который мы помещаем между полюсами магнита. Попад в магнитное поле H_e (индекс e означает, что поле внешнее), образец намагнитится, т. е. приобретет магнитный момент. Пусть этот образец имеет форму плоского бруска, а внешнее магнитное поле направлено вдоль бруска. Тогда на торцах бруска возникнут так называемые «магнитные полюсы», которые создадут поле, направленное против внешнего поля H_e . Это поле, обязанное своим существованием все той же поверхности (вспомните домены!),— а во всяком эксперименте мы имеем дело с образцами только конечных размеров,— обозначается H_o . Его появление приводит к тому, что наш ферромагнитный образец находится вовсе не в том внешнем магнитном поле, в которое мы его помещали, а в суммарном поле внешнего и размагничивающего полей:

$$H = H_e + H_o .$$

От чего зависит размагничивающее поле и как его измерить или вычислить? Вообще говоря, оно зависит от формы образца. Логично предположить, что размагничивающее поле зависит от намагниченности — ведь его возникновение связано именно с процессом намагничивания ферромагнетика. Самое простое предположение относительно связи намагниченности и размагничивающего поля выглядит так:

$$H_o = -NM.$$

Минус указывает на противоположное направление этих величин, а N есть *размагничивающий фактор*, или *коэффициент размагничивания*.

Оказывается, эта формула в точности подходит лишь для образцов, имеющих форму эллипсоидов вращения. В этом случае размагничивающее поле однородно, т. е. все точки образца находятся в размагничивающем поле одной и той же напряженности. Для всех других тел размагничивающее поле неоднородно и к тому же зависит от магнитной проницаемости, которая сама зависит от приложенного поля. Влияние размагничивающего поля будет существенным только для тел с большой намагниченностью, т. е. для сильных магнетиков.

Теперь, наконец, можно приступить к измерениям, сказав предварительно несколько слов о методах измерения.

Баллистический метод, применяемый для исследования магнитных свойств вещества, основан на явлении электромагнитной индукции. Как известно из школьного курса физики, сущность этого явления, открытого Фарадеем, состоит в том, что в замкнутом проводнике, находящемся в переменном магнитном поле, возникает электродвижущая сила. Фарадей установил, что ток возникает в трех случаях: когда магнит перемещают около провода; когда провод перемещают относительно магнита; наконец, когда все неподвижно, но изменяется само магнитное поле (этого Фарадей достигал, помещая внутрь одной катушки другую и регулируя ток, проходящий через внутреннюю катушку). Баллистический метод основан на явлении электромагнитной индукции, но не совпадает буквально ни с одним из случаев, исследованных Фарадеем. Идея метода заключается в том, что в процессе намагничивания ферромагнетика создаваемое им поле претерпевает

изменение, в результате чего поток индукции (это магнитная индукция, «просуммированная» по контуру проводника, в нашем случае — катушки; кавычки здесь появились потому, что на самом деле нужно интегрировать, а не суммировать) изменяется, что и приводит к появлению тока в катушке. Измеряя силу тока, можно тем самым определять изменение потока индукции, откуда уже остается один шаг (математический) до значения индукции или намагниченности.

Трудности, связанные с размагничивающим полем, преодолеваются, если изготовить образец в виде тороида (бублика) или кольца. Оказывается, в этом случае размагничивающее поле равно нулю. Этот метод был теоретически обоснован и использован для магнитных измерений нашим соотечественником А. Г. Столетовым еще в прошлом веке, а более точно — в 1872 г.

Другой метод называется *магнетометрическим*. Он основан на явлении, известном с древнейших времен: отклонении магнитной стрелки в магнитном поле, которое в данном случае создается намагничиваемым образцом. Отклонение стрелки также можно связать с намагниченностью.

Теперь мы знаем, кажется, все для проведения эксперимента.

Начнем, пожалуй.

«АЛЛО, ВЫ МЕНЯ СЛЫШИТЕ!», ИЛИ ПЕТЛЯ ГИСТЕРЕЗИСА

Итак, эксперимент начался. Мы измеряем индукцию, которую определяем, например, по механическому моменту, действующему на контур. Индукция или намагниченность возникает в результате воздействия внешнего магнитного поля, напряженность которого мы тоже контролируем. В самом начале эксперимента поле

выключено, его напряженность равна нулю. А намагниченность? Чему равна она? Если нет внешнего поля, то равна нулю и намагниченность — такой ответ кажется правильным, но это только кажется. На самом деле намагниченность может быть любой! Любой в том смысле, что ее значение не выходит за пределы, очерченные природой ферромагнетика, но в этих пределах действительно любой. От чего же зависит ее значение? От того, в каких условиях испытываемый образец находился раньше, до начала эксперимента. Выходит, что результаты эксперимента зависят от предыстории образца? Это действительно так. В те времена, когда исследования магнетизма только начинались, указанное обстоятельство вносило немалую путаницу. Разные исследователи, работая, как казалось, с совершенно одинаковыми объектами, получали совершенно различные результаты! По этой причине очень важно знать *начальное* состояние ферромагнитного образца. Вот очень простой пример в пользу этого утверждения. Если образец до начала эксперимента намагничен до насыщения и вы прикладываете внешнее магнитное поле в том же направлении, что и намагниченность, вы придете к выводу, что восприимчивость вообще не зависит от поля, а это абсолютно не соответствует действительности.

Как же поступать в реальном эксперименте? Как добиться определенности в состоянии ферромагнитного кристалла? Таких возможностей две: для эксперимента следует выбирать либо полностью размагниченный кристалл, либо кристалл, намагниченный до полного насыщения. Мы выберем первый путь, а в ходе эксперимента поймем, как поступать во втором случае.

Чтобы получить полностью размагниченный образец, следует воспользоваться существованием точки Кюри. Если ферромагнетик нагрет выше точки Кюри, то, как мы уже знаем, самопроизвольное намагничи-

вание в нем исчезает. Разумеется, при температурах выше точки Кюри магнитное упорядочение никогда и не появится, поэтому после нагревания образец охлаждают до температуры, при которой будет проводиться его исследование. При этом охлаждении в кристалле возникнет спонтанная намагниченность, за которую ответственна обменная энергия, но в целом магнитный момент образца будет равен нулю, потому что он разобьется на домены.

Итак, приложим к размагниченному образцу магнитное поле H . Его значения будем откладывать на оси абсцисс. Значение же намагниченности отложим на оси ординат в том виде, в каком она вносит вклад в индукцию: $4\pi M$. Результаты наших «измерений» представлены на рис. 11. Кривая, описывающая зависимость намагниченности от приложенного магнитного поля, когда исходным состоянием является полностью размагниченное, называется *основной кривой намагничивания*. Ее типичное поведение для большинства ферромагнетиков таково: намагниченность быстро растет в

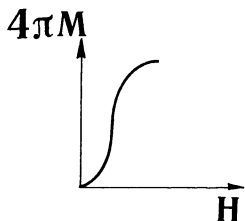


Рис. 11. Основная кривая намагничивания.

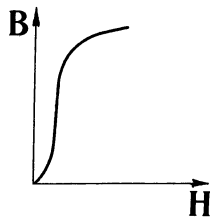


Рис. 12. Зависимость индукции от поля.

области малых полей; при дальнейшем увеличении напряженности внешнего поля рост ее замедляется и она постепенно приближается к горизонтальной прямой.

Познакомившись ранее с доменной структурой, мы можем уверенно сказать, что крутой участок кривой соответствует процессам перестройки доменов, по окончании которых наступает насыщение, т. е. однородная намагниченность всего образца. Форма кривой намагничивания является одной из важнейших характеристик данного ферромагнитного материала.

Сходную зависимость от поля обнаруживает индукция (рис. 12), также круто возрастающая в малых полях и выходящая на горизонтальный участок. Значения намагниченности и индукции, соответствующие этим горизонтальным участкам, называются *намагниченностью* и *индукцией технического насыщения* и обозначаются M_s и B_s (s — первая буква английского слова saturation — насыщение).

Из данных наших измерений нетрудно извлечь зависимость магнитной восприимчивости от поля. Для этого достаточно значения намагниченности разделить на соответствующие значения магнитного поля. Результат деления представлен на рис. 13. Восприимчивость круто растет в области малых полей, достигает достаточно острого максимума, а затем плавно убывает. Этот характерный вид восприимчивости ферромагнетика

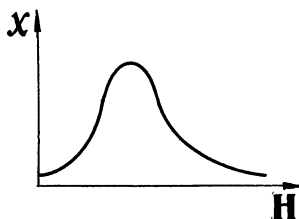


Рис. 13. Зависимость восприимчивости ферромагнетика от поля.

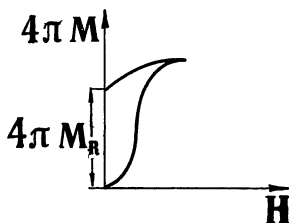


Рис. 14. Остаточная намагниченность ферромагнитного образца.

был установлен еще Столетовым. Он же обнаружил тогда, что результат эксперимента зависит от начального состояния магнитного образца.

Коль скоро есть основная кривая намагничивания, должны быть и неосновные. Что это за кривые?

Продолжим наш эксперимент. Дальнейшее увеличение поля не ведет к росту намагниченности. Давайте попробуем уменьшать его, но перед тем как начать это делать, поразмыслим над вопросом: что при этом должно произойти?

Рассуждая формально, можно прийти к выводу, что намагниченность должна также уменьшаться, возвращаясь по той же самой кривой к своему начальному значению. Такой вывод, однако, совершенно неверен. Если бы дело обстояло так, то постоянных магнитов вообще не существовало бы, вернее, они существовали бы до тех пор, пока находились во внешнем магнитном поле.

Вот такая картина наблюдается в действительности, если плавно уменьшать поле от тех значений, при которых достигнуто насыщение, до нуля: намагниченность при этом несколько уменьшается (это уменьшение зависит, конечно, от конкретного материала), но вовсе не падает до нуля (рис. 14). Значение намагниченности, соответствующее нулевому полю, называется *остаточной намагниченностью* и обозначается M_R . Как быть дальше? Нельзя ли уменьшить значение напряженности поля ниже нуля? Не надо забывать о том, что магнитное поле — это вектор и что можно изменить его направление. На графике перемена направления выразится в переходе значений напряженности магнитного поля в отрицательную область. Увеличивая поле, направленное в противоположную остаточной намагниченности сторону, мы добьемся в конце концов, что намагниченность обратится в нуль. Значение поля

H_c , необходимое для того, чтобы сделать намагниченность равной нулю, называется *коэрцитивной силой* (рис. 15.) Как и остаточная намагниченность, она является одной из важнейших характеристик магнитного материала.

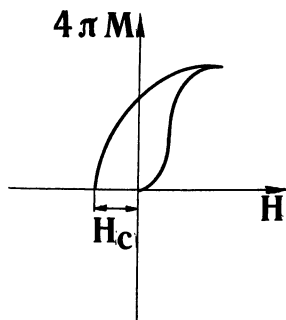


Рис. 15. Коэрцитивная сила ферромагнитного образца.

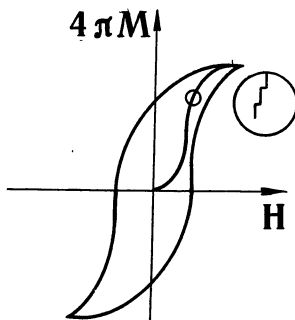


Рис. 16. Петля гистерезиса и скачки Баркгаузена.

При дальнейшем увеличении поля в ферромагнетике снова достигается насыщение с тем отличием, что намагниченность имеет направление, противоположное начальному.

Поскольку оба направления — прямое и обратное — эквивалентны, вследствие симметрии новая перемена направления поля должна снова перемагнитить образец до полного насыщения, причем намагниченность снова изменит свое направление. И действительно, кривая поведения намагниченности при обратном ходе поля симметрична по отношению к началу координат. Эксперимент это подтверждает. В результате возникает замкнутая кривая, называемая *петлей гистерезиса* (рис. 16). Само же явление «отставания» намагни-

ченности от поля (или индукции от поля) называется *гистерезисом*.

Петля, доходящая до значений насыщения, называется *предельной* или *максимальной*. Существуют и другие, неопредельные, так называемые *частные* петли. Они возникают, если процесс перемагничивания начать до достижения насыщения. Эти петли могут быть симметричны или несимметричны относительно начала координат, что зависит от равенства (или неравенства) по абсолютной величине достигнутой намагниченности в противоположных направлениях. Во всех случаях частные петли, или циклы, лежат внутри предельной кривой гистерезиса.

Возникает законный вопрос: *почему* кривая намагничивания имеет такую странную форму? По каким причинам намагниченность, столь послушно следующая за полем от полностью размагниченого состояния до насыщения, проявляет такую «строптивость» и «непокорность» при попятном ходе от насыщения к размагниченности?

Причин неподчинения намагниченности полю несколько. Чтобы понять их, нам придется снова привлечь фундаментальный принцип минимальности энергии.

Начнем с состояния полного насыщения, в котором домены отсутствуют. Если бы энергия ферромагнетика состояла только из магнитной части, то дело обстоит бы относительно просто. Уменьшение поля не привело бы к заметным изменениям намагниченности. Но ферромагнетик — это еще и просто кристалл, характеризуемый наряду с магнитными и многими другими свойствами, в частности упругими. Обладает он и упругой энергией. Нельзя забывать и о вкладе размагничивающего поля: оно, за исключением специальных случаев, также влияет на значение полной энергии. Учет всех видов энергии, хотя это дело и непростое, приводит

к тому, что состояние с однородной намагниченностью, не совпадающей с направлением поля, становится неустойчивым не сразу, а лишь при некоторых условиях, в частности когда поле направлено в противоположную намагниченности сторону и достигает при этом некоторого значения, которое и определяет коэрцитивную силу. Изменение намагниченности при этом происходит за счет необратимых процессов вращения полной намагниченности. Есть материалы, у которых перемагничивание происходит именно таким образом. Как правило, процессы вращения наблюдаются в маленьких ферромагнитных частичках — в порошках, пленках и т. д. Все они обладают высокой коэрцитивной силой — в сотни, иногда в тысячи эрстед.

Иначе обстоит дело, если при перемагничивании в однородно намагниченном кристалле могут возникнуть маленькие домены (их называют *зародышами*), магнитный момент которых направлен в противоположную сторону. Поведение этих зародышей напоминает поведение кукушек, которые, как известно, подкладывают свои яйца в чужие гнезда. Ничего не подозревающие птицы высиживают кукушонка, а тот, едва вылупившись из яйца, выкидывает из гнезда «законных» птенцов. Родители же приемыша — обычно это небольшие птички — вынуждены кормить прожорливого чужака. Магнитные зародыши при росте перемагничивающего поля поначалу также ведут себя смирно, но по достижении им некоторого значения (это, конечно, коэрцитивная сила) зародыш «выходит из яйца» и начинает расти за счет соседних с ним магнитных областей, намагниченность которых противоположна его собственной. Поскольку рост этот происходит с конечной (и немалой) скоростью, за короткое время весь кристалл становится перемагниченным.

Есть еще одна причина гистерезиса. Когда размаг-

ниченный ферромагнитный кристалл, обладающий доменной структурой, начинает намагничиваться, домены, магнитные моменты которых направлены вдоль поля, начинают расширять свои границы за счет соседних доменов с противоположно направленными магнитными моментами. Если этот процесс «завоевания» не доведен до конца, а внешнее поле выключено, то «ослабевшие» соседи оказываются не в состоянии вернуть утраченные позиции. В результате магнитные моменты в противоположных направлениях не равны друг другу, что и проявляется как остаточная намагниченность.

Необратимые процессы вращения, рост зародышей и задержка движения границ доменов — вот три причины гистерезиса.

В реальном ферромагнетике все три причины могут действовать вместе и порознь. Это зависит от большого числа факторов, среди которых не только химический состав ферромагнетика, но и способ его изготовления, наличие в нем неоднородностей и много других причин и обстоятельств (настолько много, что законченного понимания гистерезиса для всех известных случаев в настоящее время нет, хотя основные закономерности и поняты).

В заключение рассказа о гистерезисе остановимся на скачках Баркгаузена.

Если следить за ростом намагниченности более тщательно, то можно обнаружить, что она увеличивается не плавно, а скачками (см. рис. 16), которые называются скачками Баркгаузена. Именно скачками происходит та часть смещений доменных границ, которую не удастся «отвоевать» назад после выключения поля. Если намагничиваемый образец заключить в катушку, концы которой через усилитель вывести на телефон, то в процессе намагничивания в трубке раздастся слабый треск. Его происхождение непосредственно свя-

зано со скачками: когда намагниченность резко меняется, в катушке возникает ЭДС, и мы получаем возможность слышать домены. Они как бы говорят нам: «Алло, вы нас слышите? Мы действительно существуем...»

НЕ ТОЛЬКО МАГНИТНАЯ СТРЕЛКА

Все, о чем мы говорили выше, относится к теории технической кривой намагничивания. Слово «технической» попало сюда не случайно. Магнитные материалы широко используются в современной технике и особенно в энергетике. Достаточно сказать, что производство специальной стали, находящей применение в электротехнике (она так и называется: электротехническая сталь), составляет многие миллионы тонн в год. Эта сталь — лишь один из многих производимых магнитных материалов.

С тех пор как тысячи лет назад человек стал впервые практически применять магнит, изготовив из него компас (эту функцию магнит не утратил и сегодня), магнитные материалы, если можно так выразиться, завоевали современную технику. Не много есть на свете приборов, машин и устройств, в которые в качестве составной части не входил бы тот или иной магнитный элемент.

Чтобы лучше представить себе значение магнитов в современном мире, давайте мысленно изыдем магниты отовсюду, где они имеются. Самый жестокий удар такая операция нанесла бы энергетике: все генераторы электрического тока, на каких бы электростанциях (гидро-, тепло-, атомных) они ни стояли, мгновенно выйдут из строя: ведь вся их работа построена на явлении электромагнитной индукции, которое не может быть реализовано без магнитного поля, созда-

ваемого магнитами. То же самое произойдет с электродвигателями (даже при условии, что питание не выключится). Фактически вся промышленность, лишенная как источников энергии, так и возможностей ее обратного преобразования из электрической в механическую, будет парализована. Незавидной будет и судьба городов, лишенных освещения, отопления и водоснабжения. Замолчат все радио- и телестанции. Жизнь на Земле без магнитов, хотя и не была бы уничтожена, но понесла бы весьма ощутимый урон, вернувшись, как минимум, к веку пара.

К счастью, ситуация совершенно иная. Магниты не исчезают, напротив, появляются все новые и новые их разновидности. Разные отрасли промышленности и техники нуждаются в различных магнитных материалах. Их можно разбить на два основных класса: *мягкие* и *жесткие*, или *высококоэрцитивные* (само собой разумеется, что эти материалы мягкие и жесткие в магнитном, а не механическом отношении). Мягкие материалы позволяют создавать максимальный магнитный поток при минимальном внешнем магнитном поле и минимальных потерях энергии. Это может быть обеспечено в тех случаях, когда намагниченность легко меняется с изменением поля и не только на начальном участке кривой намагничивания, но при любых изменениях поля. Твердые материалы, наоборот, должны давать сильное и устойчивое по отношению к различным внешним воздействиям (внешнему полю, температуре, механическим нагрузкам) магнитное поле, а это означает, в частности, что они должны обладать большой коэрцитивной силой.

Мягкие магнитные материалы — это трансформаторное и динамное железо (последнее применяется в генераторах). Реальные генераторы вырабатывают ток низкого напряжения — оно лучше всего соответ-

ствует режиму их работы. Однако передавать потребителю по проводам выгоднее всего ток высокого напряжения. От высоковольтных линий электроэнергия поступает на подстанции, где напряжение снижается, часто в несколько приемов, и приходит, наконец, к потребителю в низковольтном виде. Каждое преобразование напряжения осуществляется в трансформаторах, параметры работы которых, в частности потери энергии при преобразовании, определяются в значительной степени качеством трансформаторного железа. Примером сверхмягкого магнитного материала служит *супермаллой* — сплав, содержащий 16 % железа, 79 % никеля и 5 % молибдена. Максимальное значение магнитной проницаемости у него достигает миллиона! В то же время коэрцитивная сила его, можно сказать, ничтожна: всего 0,002 Э.

Магнитные свойства материалов сильно зависят от их состава. Так, коэрцитивная сила технического железа, содержащего всего 0,2 % примесей, равна 0,9 Э, а чистого железа, содержание примесей в котором 0,05 %, в 90 раз меньше. Варьирование составом позволяет получать материалы с высоким значением проницаемости и низкой коэрцитивной силой, среди которых особо выделяются *пермаллои* — железоникелевые сплавы с различными добавками. Пермаллои используются в магнитных усилителях, в слаботочных трансформаторах и катушках индуктивности для систем связи и автоматики. Другой магнитомягкий материал — *перминвар* — железоникелекобальтовый сплав, который после определенной обработки имеет постоянную проницаемость, не зависящую от поля. Он находит широкое применение в радиотехнике и телефонии. Из перминвара делают также элементы памяти ЭВМ, так как они быстро перемагничиваются. Сплавы на основе железа и кобальта — *перменджоры* — имеют са-

мую высокую намагниченность насыщения среди магнитомягких материалов (для пермендюра, состоящего из 50 % железа и 50 % кобальта, $M_s = 24\,600$ Гс; для сравнения у супермаллоя это значение 7900 Гс). Однако с механической точки зрения пермендюры хрупки. Для ликвидации этого недостатка к ним добавляют небольшие «умягчающие» добавки вольфрама, ванадия и молибдена. Эти сплавы используются в электромагнитах и телефонных мембранах.

Особое место занимают в семействе мягких магнитных материалов *ферриты* — полупроводниковые ферромагнетики, применяемые в высокочастотной радиотехнике. Особенность их состоит в том, что по условиям эксплуатации они находятся в электромагнитных полях, направление и абсолютное значение которых меняются с очень высокой частотой: от десятков тысяч до миллионов герц (колебаний в секунду). Будь на их месте ферромагнетики типа железа — металлы, обладающие высокой проводимостью, наблюдалась бы такая картина: при всяком изменении поля свободные электроны меняли бы характер своего движения, «бросаясь» то в одном, то в другом направлении. Результат этого хаотического метания, как вы помните, называется *токами Фуко*. Их возникновение приводит к тому, что высокочастотное поле теряет энергию. Это крайне нежелательно в любых радиотехнических устройствах. И полупроводниковые ферромагнетики — ферриты — прекрасно справляются со своей задачей. Физической предпосылкой их успеха является чрезвычайно малое количество свободных электронов в этих материалах. Электросопротивление ферритов превышает сопротивление ферромагнетиков-металлов в 10 миллиардов раз! Ферриты входят составной частью во все катушки индуктивности радиоприемников, телевизоров, магнитофонов. Из них изготовлены внутренние антенны мало-

габаритных приемников. К сожалению, ферриты имеют весьма низкую магнитную проницаемость, а ведь они и так работают в слабых полях (оцените, сколько энергии попадает от передающей радиостанции на крохотную антенну радиоприемника). Поэтому принимаются специальные меры, чтобы проницаемость повысить. Оказывается, подмешивание цинка к обычному магнетику позволяет увеличить магнитную проницаемость феррита во много раз.

Хотелось бы подчеркнуть, что сама возможность менять свойства материалов основана на глубоком понимании их структуры, выяснении связи между магнитными и немагнитными характеристиками магнетиков. Мы уже упоминали, что магнитные и упругие свойства некоторых материалов могут находиться в сильной зависимости. Помещение такого материала в магнитное поле вызывает его деформацию — искажение формы, и наоборот, деформирование влечет за собой появление у образца магнитного момента (или изменение, если он уже имелся). Такие материалы называются *магнитострикционными* (само явление называется *магнитострикцией*). Их успешно применяют для конструирования генераторов звуковых и ультразвуковых частот. Помещая такой материал в высокочастотное магнитное поле, можно добиться, чтобы он деформировался (колебался) с такой же частотой. Механические колебания и служат источником звука соответствующей частоты. Основной материал, используемый в генераторах, — никель. Поскольку никель — металл, обладающий высокой проводимостью, то для уменьшения токов Фуко его изготавливают в виде очень тонких листов (напомним, что электросопротивление обратно пропорционально сечению). Хорошим магнитострикционным материалом является сплав железа с 13 % алюминия, обладающий к тому же большим

(в 12 раз по сравнению с никелем) сопротивлением.

Все мягкие магнитные материалы имеют узкую петлю гистерезиса. Твердые магнитные материалы характеризуются широкой петлей гистерезиса, иначе говоря, большими значениями коэрцитивной силы и остаточной индукции. Основная область их применения — постоянные магниты, которые используются в разнообразных приборах: репродукторах, магнитофонах, телефонах, электрогенераторах, электронных микроскопах, осциллографах, компасах, ускорителях элементарных частиц и т. д., каталог которых мог бы, вероятно, превысить объем этой книги.

К твердым, или жестким, магнитным материалам относятся закаленные легированные стали, которые в первую очередь начали применять в качестве постоянных магнитов. Металлурги научились изготавливать их с конца XIX в. Обычная углеродистая сталь с низким содержанием углерода (не выше 1 %) имеет коэрцитивную силу 50—60 Э и остаточную индукцию около 10 000 Гс. Ее недостаток состоит в том, что она «стареет», утрачивая свои магнитные свойства. Чтобы помочь сохранить магнитную «молодость», применяют легирующие добавки, в качестве которых используются различные элементы: вольфрам, хром, молибден и особенно успешно кобальт (напомним, что кобальт, как и железо, ферромагнитен). Хотя эти добавки невелики (обычно составляют несколько процентов, реже — десятки процентов), они существенно улучшают магнитные характеристики стали, делая их одновременно и более устойчивыми.

Однако, как и в случае мягких магнитных материалов, наибольшего разнообразия магнитных свойств удается достичь при использовании различных сплавов. В 1931 г. были предложены железные сплавы с никелем (около 12 %) и алюминием (около 25 %), получившие

название *альни* (в нем легко угадывается сокращение по первым буквам компонентов). Коэрцитивная сила этих сплавов может превышать 500 Э, а при добавлении кобальта (сплав *альнико*) или кремния (сплав *альни-си*) и того выше — до 1000 Э. Остаточная намагниченность их достигает нескольких тысяч гаусс. Существенным недостатком этих сплавов является невозможность их механической обработки. Магниты из них отливаются в готовом виде, без последующей доводки. В тех случаях, когда такая доводка все же необходима, используют сплавы с добавлением «смягчающих» элементов — меди и ванадия. Их магнитные характеристики несколько хуже, чем у сплавов альни, зато их можно ковать, резать, словом, обращаться с ними, как с нормальным металлом.

Внесли свой вклад в разнообразие магнитных свойств и драгоценные металлы, которые более привычно видеть в руках ювелиров, а не металлургов. Оказалось, что сплавы платины с железом и кобальтом обладают высокой коэрцитивной силой — до нескольких тысяч эрстед. Их использование целесообразно там, где по условиям эксплуатации магниты должны находиться в агрессивной (например, кислотной) среде.

Все магнитные материалы, о которых шла речь до сих пор, — это кристаллы. Если вы обратили внимание на подзаголовок нашей книги, то, конечно, заметили, что после магнитных твердых тел следует ожидать рассказа о каких-то жидкостях, обладающих магнитными свойствами. Именно так и будет, но прежде чем перейти к жидкостям, остановимся на материалах, занимающих промежуточное положение между кристаллами и жидкостями. Таковыми являются *аморфные твердые тела*.

Аморфные твердые тела — явление странное и до

сих пор как следует не понятое. Простейшее аморфное тело — это обычное оконное стекло, которое вы можете видеть каждый день. Аморфное тело можно уподобить застывшей жидкости. Застывшей, но не кристаллизовавшейся. Исследования структуры аморфного тела с помощью рентгеновских лучей показывают, что порядок в таких системах поддерживается только на малых расстояниях; такой порядок называют *ближним*. А характерного для кристалла *дальнего порядка* (вспомним о трансляционной инвариантности) в аморфном теле нет.

Стекло — аморфное тело, но оно не обладает сильным магнетизмом. Можно ли сделать материал, который проявляет сильные магнитные свойства, аморфным? Оказывается, да.

Существует по крайней мере два способа, позволяющих получить в аморфном состоянии магнитные вещества, которые обычно являются кристаллами. Оба достаточно любопытны и стоят того, чтобы рассказать о них хотя бы вкратце. Первый способ связан со сверхбыстрым охлаждением расплавленного металла. Скорость охлаждения должна быть порядка миллиона градусов в секунду! Как же достичь такой скорости? Процесс выглядит на удивление просто: тонкую струю расплавленного металла льют на быстро вращающийся массивный медный барабан (медный потому, что у меди высокая теплопроводность). В результате получается тонкая длинная лента, которая находится в аморфном состоянии. Чтобы пояснить сущность происходящего процесса, заметим, что при быстром охлаждении беспорядок, существующий в жидкости, как бы «замораживается». Атомы «застывают» на тех местах, где их застало быстрое охлаждение, не успев выстроиться в кристаллические «ряды».

Аморфизация такого металла (а в настоящее вре-

мя известно около 200 металлов, аморфизирующихся при описанном процессе) имеет два следствия. Аморфные пленки обладают повышенной прочностью, а те из них, которые в своем нормальном кристаллическом бытовании являются сильными магнетиками, сохраняют свои магнитные свойства, но являются *сверхмягкими магнитными материалами*. Не вдаваясь в подробности, связанные с использованием их особых механических свойств (это выходит за рамки нашей темы), отметим, что аморфные пленки нашли успешное применение в обмотках трансформаторов, где их удивительно малая коэрцитивная сила, составляющая сотые доли эрстеда, пришлась как нельзя более кстати.

Второй способ состоит в перемалывании металлического порошка (из чистого металла или сплава) в устройстве, напоминающем шаровую мельницу. Порошинки, деформируемые шарами, которые в свою очередь перемешиваются мешалками, в процессе такого помола аморфизируются, да к тому же два порошка разных металлов (например, никеля и алюминия) образуют сплав, за что сама технология получила название *механического сплавления*, или *механического легирования*.

Вернемся к опытам Акулова и Биттера, в которых было доказано существование доменов — областей ферромагнетика с однородной намагниченностью. Вы помните, что они использовали в своих экспериментах «гибрид» твердого ферромагнетика и жидкости: взвесь твердых ферромагнитных частиц в керосине. Такую «смесь» с полным основанием можно назвать искусственным магнитным материалом.

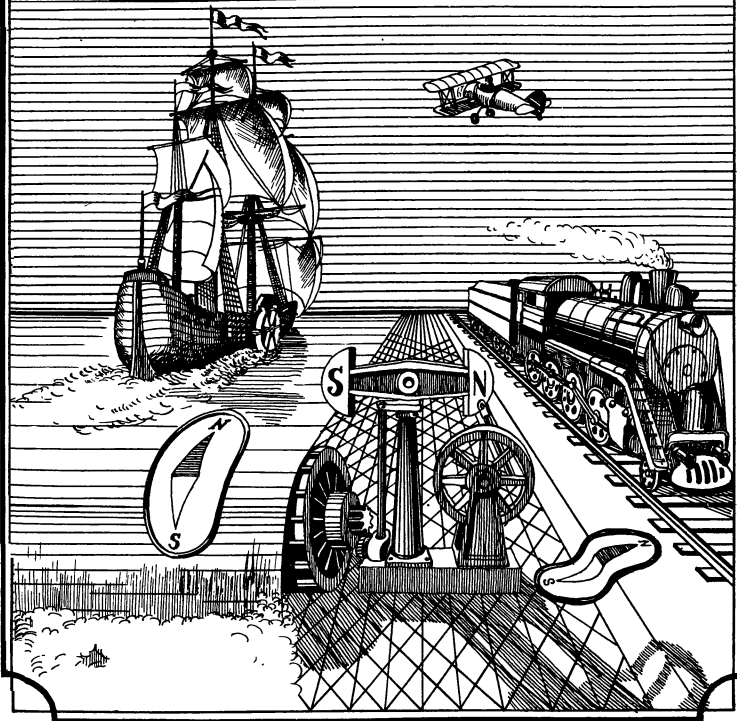
Итак, порошок ферромагнитного материала взвесили в жидкости. Что дал этот симбиоз? Прежде всего с его помощью удалось подтвердить гипотезу Вайса. Кроме того, дальнейшие исследования показали, что

такая система при наложении сильного магнитного поля «затвердевает». Причина «затвердевания» состоит в сильном взаимодействии частиц, каждая из которых объединяет несколько доменов. Действительно, когда магнитные моменты отдельных доменов одной частицы выстраиваются вдоль поля, частица уподобляется маленькому постоянному магниту с южным и северным полюсами. Как же ведет себя совокупность магнитиков, взвешенных в жидкости? Вполне естественно, что магнетики притягиваются друг к другу разноименными полюсами, образуя в результате жесткую систему.

Первое техническое применение взвеси ферромагнитного порошка в кремнийорганических и минеральных маслах базировалось как раз на их способности «затвердевать» в сильном магнитном поле. На их основе были разработаны так называемые порошковые муфты и тормоза. Большого распространения, однако, они не получили: при снятии поля такая система не восстанавливала своего первоначального состояния. Причиной была, конечно же, остаточная намагниченность. Будучи однажды намагниченными, ферромагнитные частицы размагничивались с большой неохотой. Хотя жидкость и фигурировала в составе магнитной системы, ее присутствие там носило в определенной степени формальный характер: ведь свойства жидкости и магнитные свойства существовали как бы отдельно. Грубо говоря, они «складывались» арифметически и при наложении внешнего поля так же легко «вычитались». Однако рациональное зерно в этой системе содержалось, и со временем оно дало всходы.

О судьбе магнитного материала, возникшего благодаря методу порошковых фигур, наш дальнейший рассказ.

МАГНИТЫ, КОТОРЫЕ ТЕКУТ



ОПИЛКИ ДЛЯ ДВИГАТЕЛЯ

Известно ли вам, как устроена топливная система ракетного двигателя? Общая схема питания космического аппарата такая же, как и легкового автомобиля: топливо всасывается насосом из бака и нагнетается в двигатель. Предположим, что по какой-то причине в автомобильной системе произошел разрыв сплошной струи топлива в топливной магистрали. Причины для беспокойства в этом случае нет! Атмосферное давление, действующее на топливо, и вес столба жидкости протолкнут образовавшийся пузырь, и насос снова начнет захватывать топливо, направляя его в двигатель. В космическом аппарате в состоянии невесомости все обстоит не так просто. Жидкость и пар в невесомости «весят» одинаково, и паровой пузырь, попав в насос, преградит путь топливу. Нетрудно представить, чем это грозит в космосе, где этапы маневрирования аппарата рассчитаны с точностью до долей секунды.

Первая мысль, которая приходит в голову при обдумывании этой проблемы, такова: нельзя ли воздействовать на жидкость другой силой, не связанной с массой, например магнитной силой, втягивающей намагничивающееся вещество в область сильных полей? Идея неплоха, но, как известно, жидкие ферромагнетики, да еще такие, которые могут служить ракетным топливом, пока в природе не обнаружены. Все известные жидкости обладают чрезвычайно слабыми магнитными свойствами. Даже аномально сильный парамагнетик — жидкий кислород — имеет объемную восприимчивость $\chi_{O_2} = 3 \cdot 10^{-4}$ при 90 К. Это очень мало по сравнению с начальной объемной восприимчивостью даже такого слабого магнетика, как феррит железа (магнетит), $\chi_{Fe_3O_4} = 69$. Как же придать топливу магнитные свойства? Нашелся изобретательный человек, аме-

риканский исследователь Стефан Пейпелл, который предложил «насыпать» мелкие частицы твердого магнитного материала в топливо, чтобы можно было действовать на него магнитным полем. Ясно, что смесь не должна была расслаиваться в магнитном поле, иначе частицы притянутся к магниту, а топливо останется в баке. Поэтому Пейпелл дробил частицы до коллоидных размеров.

КАК ГОТОВЯТ МАЙОНЕЗ

Чтобы разобраться в мотивах, побудивших Пейпелла выдвинуть свою идею, поговорим о коллоидном состоянии вещества. Свойствами коллоидных растворов твердых веществ занимается *коллоидная химия*. Само существование коллоидной системы возможно при условии, что взвешенные в жидкости твердые частицы не оседают под действием силы тяжести. Это значит, что они должны быть настолько малы, чтобы тепловое (броуновское) движение молекул жидкости разбрасывало их по объему и не позволяло оседать на дно сосуда. Другими словами, скорость оседания частиц — *седиментации* — не должна быть выше скорости хаотического броуновского движения. Максимальный размер коллоидных частиц, позволяющий выполнить это условие, зависит от разности плотностей твердых и жидких фаз, вязкости жидкости-носителя и температуры. В устойчивых коллоидах размеры частиц лежат в пределах от 1 до 100 нм.

Тщательно приготовленные коллоидные растворы обладают высокой устойчивостью. Например, коллоидные растворы золота, приготовленные Фарадеем еще в 1857 г., до сих пор не проявляют признаков старения. Другой пример устойчивого коллоидного раствора — столовый майонез. Для приготовления майонеза берут

высококачественное растительное масло, добавляют в него яичный желток, уксус, сахар и иногда другие пряности. В этой среде взвешивают коллоидные частички горчичного порошка, который получают из жмыха семян горчицы. Твердые частицы, имеющие размеры, приведенные выше, должны находиться в сфере действия молекулярных сил притяжения (ван-дер-ваальсовых сил), радиус действия которых составляет около 1 нм, а зависимость от расстояния имеет вид $1/r^7$. Ван-дер-ваальсовы силы в конечном счете объясняются взаимодействием электрических зарядов. Действительно, некоторые вещества состоят из молекул, конфигурация которых такова, что положительный заряд ядер и отрицательный заряд электронов разделены в пространстве. В этом нет противоречия с известным положением об электрической нейтральности молекул, так как сумма положительных зарядов равна суммарному отрицательному заряду, но в одной части молекулы преобладают положительные заряды, а в другой — отрицательные. Примером может служить молекула воды (рис. 17).

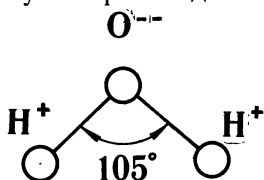


Рис. 17. Строение молекулы воды.

Введем определение: два равных разноименных заряда, разделенных некоторым расстоянием, образуют *электрический диполь*. Такие молекулы называются *дипольными (полярными)*

и характеризуются *дипольным электрическим моментом* (произведением величины заряда на расстояние между зарядами). Нетрудно представить, как такие молекулы ориентируются относительно друг друга при взаимном сближении: разноименные заряды стремятся соединиться — молекулы притягиваются.

А как обстоит дело с неполярными молекулами,

электрические заряды в которых расположены симметрично? Для них необходим некоторый возбудитель в виде полярной молекулы или иона, в присутствии которых появляется дипольный момент и у неполярных молекул. После этого они взаимодействуют, как полярные. Есть, однако, еще один механизм молекулярного притяжения, влияние которого обычно превышает влияние двух упомянутых. Он имеет место как в полярных, так и в неполярных молекулах и связан с относительным смещением ядер и электронов молекулы во времени, что приводит к возникновению периодически изменяющегося диполя. При сближении молекул мгновенный диполь в одной из них индуцирует диполь в другой, а взаимодействие между ними и заставляет молекулы притягиваться.

Вернемся теперь из микромира к жидкостям типа майонеза. Коллоидные частицы, в результате теплового движения приблизившиеся друг к другу на расстояние порядка двух радиусов (до соприкосновения поверхностей), будут испытывать очень большие силы притяжения. Расчеты показывают, что для сфер одинакового размера энергия притяжения равняется энергии теплового движения при комнатных температурах, когда их поверхности находятся на расстоянии порядка радиуса этих сфер, не ближе. На меньших расстояниях несколько частиц будет слипаться (агрегатировать). Когда размер агрегатов превысит максимальный размер частиц, при котором тепловое движение в состоянии противодействовать оседанию коллоидных частиц, произойдет выпадение твердой фазы из раствора (весь этот процесс называется *коагуляцией*). Чтобы картина была полной, надо упомянуть еще о силах отталкивания, действующих между микрочастицами на очень малых расстояниях. Они тоже имеют электрическую природу и объясняются довольно просто: на расстояниях между цен-

трами молекул порядка 0,1 нм внешние электронные оболочки молекул начинают перекрываться, и преобладающими становятся силы кулоновского отталкивания.

Оказывается, что силы отталкивания при сближении частиц возрастают быстрее, чем силы притяжения; в результате на определенном расстоянии они компенсируют друг друга. Здесь и проходит граница между притяжением и отталкиванием. Важно, что молекулярные силы притяжения начинают проявляться на таких расстояниях, при которых силы отталкивания еще не сказываются. Когда частицы указанных выше размеров сближаются, то отталкивания вообще не наблюдается, так как они соприкасаются (и, следовательно, отталкиваются) только в одной точке, а все остальные точки поверхности находятся в сфере сил притяжения. Так что в устойчивых коллоидах должен действовать какой-то другой фактор, ограничивающий возможность частиц приближаться друг к другу. Этот механизм стабилизации коллоидного раствора связан с большой удельной поверхностью коллоидных частиц (отношение площади поверхности раздела твердой и жидкой фаз к суммарному объему твердой фазы $S_{уд} = S/V$).

Было установлено, что с ростом $S_{уд}$ увеличивается способность частиц собирать и удерживать на своей поверхности растворенные в жидком носителе вещества. Это явление, называемое *адсорбцией*, объясняется тем, что силовое поле вблизи поверхности частиц ненасыщено из-за различия сил притяжения между молекулами твердой частицы и молекулами частицы и окружающего вещества. В простейшем случае можно представить, что поверхность частицы несет электрический заряд. Тогда электрические заряды противоположного знака в молекулах растворенных веществ будут притягиваться к поверхности, образуя на поверхности частицы уплотненный слой ориентированных молекул. Так же

выстраиваются электрически заряженные частицы — ионы. Такова простейшая модель процесса адсорбции. Конечно, в общем случае молекулярное силовое поле у поверхности частицы намного сложнее, и кулоновское притяжение не является единственным механизмом адсорбции в коллоидах. Например, при адсорбции на активных участках поверхности возможно образование химического соединения между адсорбируемыми молекулами и материалом частицы. Подобная адсорбция называется *хемосорбцией*.

Рассмотрим подробнее механизмы стабилизации коллоидных растворов. Начнем с электростатического отталкивания коллоидных частиц, которое, как мы увидим дальше, очень похоже на отталкивание микро-частиц в твердых телах.

Причина появления заряда вблизи частицы — избирательная адсорбция ионов, образованных несущей средой (например, H^+ , гидроксильный ион OH^-) или растворенными в несущей среде веществами. В результате возникает разность потенциалов между адсорбционным слоем, состоящим из ионов одного знака, и близлежащей жидкостью, так как в пространстве вокруг частицы собираются ионы противоположного знака. Это ионное «облако», плотность которого падает по мере удаления от частицы, как раз и препятствует сближению коллоидных частиц: ведь все они окружены такими же «облаками». Как видите, процесс взаимодействия частиц действительно напоминает отталкивание внешних электронных оболочек молекул. Описанная структура, состоящая из коллоидной частички, окруженной двойным электрическим слоем, носит название *мицеллы*. Разделение зарядов противоположного знака вблизи частицы приводит к возникновению разности потенциалов в двойном электрическом слое от 10 до 100 мВ. Описанный двойной электрический слой может

быть образован не только ионами, но и адсорбированными на поверхности частиц молекулами особых веществ, называемых *поверхностно-активными*. О них разговор пойдет позже, когда мы займемся структурой магнитной жидкости.

Можно организовать препятствие для сближения частиц в виде предохранительной оболочки, окружающей каждую частицу. Такую «шубу» частица получает при адсорбции на своей поверхности молекул несущей среды либо молекул третьего компонента (стабилизатора) системы. *Сольватная оболочка* (так называется «шуба») представляет собой «барьер», взятый который частицам не удастся. Он и не позволяет частицам сближаться на такое расстояние, когда броуновское движение уже «бессильно» противодействовать их слипанию. Сольватация частиц обычно имеет место, когда их поверхностные молекулы вступают в химические связи с адсорбируемыми молекулами (мы уже говорили выше о хемосорбции).

Таковы механизмы, которые могут обеспечивать устойчивость раствора коллоидных частиц в несущей среде. Какими же способами получают столь мелкие твердые частицы для коллоидных растворов? Обычно системы из двух или большего числа фаз с сильно развитой поверхностью раздела называют *дисперсными*. В дисперсных системах по крайней мере одна из фаз — дисперсная — распределена в виде мелких твердых частиц в другой, сплошной, фазе — дисперсионной среде. Для дисперсных систем основной характеристикой является размер частиц R или *дисперсность* $D = 1/R$ (величина, обратная радиусу частицы). В зависимости от D дисперсные системы делятся на грубодисперсные (низкодисперсные) и тонкодисперсные (высокодисперсные). В дальнейшем нас будут интересовать только тонкодисперсные системы с размерами

частиц от 1 до 100 нм. Известны два пути получения частиц таких размеров: измельчение грубодисперсных частиц и выращивание их из молекулярного состояния до коллоидного размера. В соответствии с этим все известные методы получения коллоидных систем можно разделить на два больших класса: *методы диспергирования* и *методы конденсации*.

В обоих случаях диспергирование или конденсацию продолжают до тех пор, пока не будет достигнут желаемый размер коллоидной частицы. Вспомним, как ломают металлическую проволоку, когда под рукой нет кусачек. При многократном сгибании и разгибании проволоки на ее поверхности возникают микротрещины, которые понижают прочность материала и в конечном счете приводят к желаемому результату. Методы диспергирования основаны на этом же принципе периодической деформации материала частицы, только способы создания нагрузки другие. Наиболее распространенными считаются ударные, режущие, скалывающие, истирающие нагрузки в шаровых, дисковых, вибрационных и других мельницах. Можно использовать также воздействия ультразвуковых колебаний, высоковольтного электрического разряда в жидкой основе и т. д. Мы не будем подробно рассматривать эти методы, потому что они трудоемки, непроизводительны и уступают методам конденсации по степени дисперсности получаемых частиц.

Что лежит в основе конденсационных методов? На с. 105 мы уже использовали понятие «зародыш». Применительно к выращиванию кристаллов это слово обозначает некоторый центр, с которого начинается рост кристалла. Зародышем может стать любая неоднородность: пылинка, неровность на поверхности, инородный атом. Зародыши «собирают» вокруг себя ионы и молекулы из раствора и, постепенно увеличи-

ваясь, вырастают в настоящий кристалл.

Как быть, если мы хотим получить много кристалликов одинакового размера? Нужно создать такие условия, при которых зародыши возникали бы быстрее, чем успевают расти кристаллы, в противном случае кристаллов вырастет мало, к тому же они будут существенно отличаться друг от друга размерами: ведь «старые» кристаллы намного опережат «молодых» в своем росте. Словом, вырастить кристаллы-близнецы непросто; нельзя забывать и о том, что на их рост влияет множество факторов: температура, концентрация веществ в растворе, процедура смешивания этих веществ.

Оказалось, что для выращивания частиц коллоидных размеров следует использовать концентрированные растворы, которые в процессе выращивания нужно интенсивно перемешивать и подогревать. Конкретная реализация конденсационных методов довольно разнообразна: конденсация атомов металлов в вакууме, в газовых средах, термическое разложение металлических соединений, химические реакции, электролиз солей металлов и многое другое.

Синтезированные в 60-х годах магнитные жидкости и представляют собой коллоидный раствор мельчайших частиц магнитного материала в жидкости-носителе. Если для обычных коллоидов размеры частиц снизу не ограничиваются, то для магнетика они имеют предел, который, как нетрудно догадаться, определяется критическим размером доменов для данного материала. С. Пейпелл дробил грубодисперсные частицы ферритов до однодоменных размеров в шаровых мельницах весьма длительное время. Несколько недель без перерыва металлические шары падали вниз после набора высоты во вращающемся цилиндрическом корпусе и дробили порошок магнетита в смеси керосина и олеиновой кислоты.

Полученное вещество черного цвета притягивалось магнитом без разделения твердых частиц и жидкости. Действительно, неоднородное магнитное поле стремится втянуть каждую однодоменную частицу, подобную микроскопическому постоянному магниту, в область сильного поля. Так как в 1 см^3 магнитной жидкости содержится порядка 10^{17} таких частиц, то сила, действующая на каждую частицу, передается вязким трением прилегающим слоям жидкости, и весь объем раствора движется в область сильных полей как одно целое.

Чтобы представить себе яснее величину 10^{17} , проделаем такой мысленный опыт. Предположим, мы имеем возможность каждую секунду извлекать из 1 см^3 магнитной жидкости одну магнитную частицу. За какое время мы сумеем сделать этот объем немагнитным, т. е. вытащить все микроскопические постоянные магниты? Простой подсчет дает такой результат: за один год мы извлечем приблизительно $3 \cdot 10^7$ частиц. Следовательно, нам понадобится $3 \cdot 10^{16}/10^7 = 3 \cdot 10^9 = 3$ миллиарда лет. Поскольку время нашего опыта соизмеримо с временем перехода Солнца в стадию белого карлика, придется отказаться от него.

НЕМНОГО О САМОСТОЯТЕЛЬНОСТИ

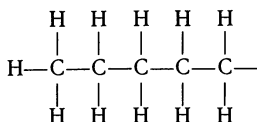
Коллоидные частицы в магнитной жидкости представляют собой крошечные магниты. По этой причине между ними действует еще одна сила взаимного притяжения (по сравнению с молекулярной в обычных коллоидах). Как ведут себя железные опилки, побывавшие в сильном магнитном поле? Они собираются группками, как толпа зевак на улице, в которой трудно различить черты отдельных людей. Силы, действующие между этими миниатюрными постоянными магнитами,

напоминают взаимодействие электрических диполей с тем отличием, что здесь притягиваются разноименные магнитные полюсы, а не заряды. Численное значение этой силы пропорционально квадрату намагниченности M^2 и кубу линейного размера частицы. Здесь и в дальнейшем мы для простоты предполагаем, что частицы имеют сферическую форму: электронно-микроскопические исследования магнитных жидкостей с магнетитом, полученным химическим путем, показали справедливость такого предположения.

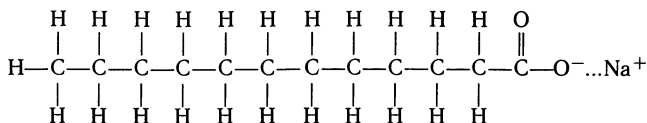
Уменьшая размер частицы, можно добиться того, чтобы энергия теплового движения, равная $\frac{3}{2}kT$ для сферической частицы (k — постоянная Больцмана; T — абсолютная температура), превышала энергию так называемого диполь-дипольного магнитного взаимодействия. Мы опять приходим к проблеме измельчения частиц магнитного материала. Но этот процесс, как мы видели ранее, увеличивает удельную поверхность и, следовательно, свободную энергию всей системы. Так как в соответствии с известным законом природы система стремится занять положение с наименьшей энергией, то магнитная жидкость будет стремиться к равновесному состоянию с минимальной межфазной поверхностью и частицы будут объединяться под действием молекулярного или магнитного притяжения, если нет факторов, затрудняющих их «коллективизацию». Вам нужно получить устойчивый магнитный коллоид? Найдите способ сделать поведение каждой частицы самостоятельным.

Из различных механизмов стабилизации коллоидов для магнитных жидкостей наиболее подходящим оказалась адсорбция на частицах молекул поверхностно-активного вещества, добавляемого в жидкую основу в процессе производства магнитного коллоида.

Поверхностно-активные вещества столь своеобразны по своим свойствам, что надо рассказать о них подробнее. Это главным образом органические соединения. Молекулы у них обычно велики и состоят из двух частей. Одна охотно притягивается к поверхности частиц материала, снижая их поверхностную энергию, а другая имеет сродство к несущей среде. Такого рода молекулы мы приобретаем в хозяйственных магазинах, покупая мыло и синтетические стиральные порошки. Только они «чувствительны» к частицам жирной грязи и прицепляются к ним своей длинной углеводородной цепью, подобной следующей:



Цепь эта, впрочем, не должна быть слишком велика, чтобы порошок хорошо растворялся в воде. Другие концы молекул выступают наружу и притягивают воду, облегчая ей доступ к частичкам жира, которые в конечном счете смываются в виде *эмульсии* (скопление мелких частиц жира, взвешенных в воде). В обычном мыле, например, на «водяном» конце молекулы расположен атом натрия, отделяющийся в воде в виде иона Na^+ и притягивающий молекулы воды, которые, как мы уже знаем, несут разноименные электрические заряды. В изображении химика мыло приобретает следующий «нетоварный» вид:



Другой, более технический пример применения поверхностно-активных веществ связан с отделением минералов от «пустой» породы. Для этого породу, содержащую также и металлическую руду, размалывают и погружают в воду, содержащую специальные масла. Эти масла прилипают только к кусочкам руды и вместе с пузырьками воздуха, продуваемыми через *суспензию* (взвесь твердых частиц в жидкости), уносятся на поверхность, где руду и собирают. К смоченным водой кусочкам пустой породы воздушные пузырьки не пристают, «бесполезный» песок намокает и опускается на дно. Такая схема обогащения руд, называемая *флотацией*, успешно применяется в горной промышленности.

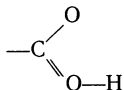
Вернемся к однодоменным частицам магнитного материала, которые для получения магнитного коллоида с заданными характеристиками должны быть взвешены в самых разнообразных жидкостях. Требования к жидкому носителю следуют из условий эксплуатации конкретного устройства с магнитной жидкостью. В дальнейшем мы уделим много внимания таким устройствам, а пока назовем лишь часть используемых жидкостей: углеводороды, основу которых составляют углеводородные цепи, подобные изображенной на с. 129 (характеризуются низкой испаряемостью в глубоком вакууме); сложные эфиры, в которых углеродные цепи соединяются через кислородные «мостики» (сохраняют свойства жидкости при очень низких температурах); фторорганические (обладают химической совместимостью с такими агрессивными средами, как хлор, озон и т. п.); кремнийорганические (характеризуются низкой испаряемостью и высокой температурой вскипания в вакууме); минеральные масла (обеспечивают смазывающий эффект между трущимися деталями); вода.

От магнитного материала зависят магнитные характеристики коллоида. Естественным было желание получить жидкости с железом или кобальтом, намагниченность насыщения которых выше, чем у других магнетиков. Расчет прост: чем выше намагниченность каждой частицы материала, тем меньше их должно содержаться в единичном объеме, чтобы получить одинаковую намагниченность жидкости $M_0 = \varphi M_s$, суммирующую все магнитные моменты частиц. Однако, как это часто бывает, самый очевидный путь не оказался самым простым. Многочисленные работы по синтезированию магнитных жидкостей показали, что, используя материал с меньшей намагниченностью отдельного домена M_d (например, магнетит), можно получить такую же (и даже бóльшую!) намагниченность путем значительного увеличения концентрации φ . Приведем некоторые цифры для лучших жидкостей на кремнийорганической основе: Fe — $M_s = 1,72 \cdot 10^6$ А/м, $M_0 = 1,5 \cdot 10^5$ А/м; Co — $M_s = 1,51 \cdot 10^6$ А/м, $M_0 = (0,8 - 1,0) 10^5$ А/м; Fe₃O₄ — $M_s = 4,77 \cdot 10^5$ А/м, $M_0 = 1,0 \cdot 10^5$ А/м.

Причина, по которой оказалось возможным достижение этих результатов, заключается в успешном выполнении очень важной процедуры при синтезе магнитных жидкостей, а именно в подборе хорошего поверхностно-активного вещества. Какие качества скрываются под расплывчатой характеристикой «хорошее»? Как мы уже знаем, длинные молекулы поверхностно-активного вещества должны хорошо адсорбироваться на поверхности твердой частицы и в то же время растворяться в несущей среде. Опять «хорошо»! Под этим подразумевается возможность образования слабых химических связей между материалом частицы и поверхностно-активным веществом (хемосорбция!), которые сильнее чисто адсорбционных (химическое взаимодействие противопоказано, так как в результате

магнитный материал превращается в немагнитный). Ведь нам нужно, чтобы магнитная жидкость сохраняла устойчивость, которая зависит от сохранности адсорбционного слоя на частицах при действии температуры, вибраций и других факторов. Таки образом, «хорошее» поверхностно-активное вещество должно плотно прилипать к поверхности частиц из металлов или их оксидов.

Для магнетита нашелся очень хороший стабилизатор — олеиновая кислота, молекулы которой содержат функциональную группу COOH , «объединяющуюся» с магнетитом. Химическая формула олеиновой кислоты $\text{C}_{18}\text{H}_{37}\text{COOH}$; она является «жирной кислотой», и кислотный конец ее молекулы имеет вид



Расписывать ее инертную часть, содержащую 18 атомов углерода, мы не будем в целях экономии места. Приведем только некоторые цифры: площадь поперечного сечения молекулы олеиновой кислоты составляет приблизительно $46 \cdot 10^{-20} \text{ м}^2$, длина — около 2 нм.

Для частиц железа и кобальта такого вещества подобрать не удалось, и их обычно стабилизируют набором высокомолекулярных органических соединений (включающим и олеиновую кислоту), которые варьируют в зависимости от свойств жидкого носителя.

Не думайте, однако, что с помощью олеиновой кислоты были решены окончательно проблемы стабилизации частиц магнетита во всем многообразии несущих сред: для фторорганических жидкостей, например, могут применяться только специальные вещества, называемые перфторированными углеводородами.

Существует еще одно достоинство магнетита как

дисперсной фазы. Его легко получить методом химической конденсации, сливая растворы $\text{FeCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ и $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$. При выполнении некоторых дополнительных условий, хорошо известных химикам, в осадок выпадает магнитный Fe_3O_4 , отличающийся *монодисперсностью* (одинаковыми размерами) частиц со средним диаметром $d \approx 10$ нм, хорошими магнитными свойствами и, что особенно важно, хорошей адсорбционной способностью.

Итак, процесс производства магнитной жидкости состоит из двух этапов: 1) получения высокодисперсных частиц магнитного материала; 2) взвешивания их в жидкой основе с помощью специально подобранного поверхностно-активного вещества. Эти операции взаимосвязаны, так как стабилизацию желательно вести в момент образования коллоидных частиц, чтобы сразу предотвратить возможность их слипания и защитить поверхность частиц от окисления. Количество используемого поверхностно-активного вещества должно быть достаточным, чтобы все частицы имели собственную «шубу». Вот, пожалуй, все основные правила, которые соблюдаются при синтезе магнитных жидкостей. Полученный коллоид неплохо залить затем в центрифугу, вращающуюся с высокой скоростью, чтобы отделить наиболее крупные частицы и те, которые не сумели «облачиться» в защитный наряд». В результате магнитная жидкость будет иметь структуру, изображенную на рис. 18. Каждая частичка покрыта слоем поверхностно-активного вещества «толщиной» в одну молекулу. При сближении частиц «торчащие» концы молекул не позволяют им приблизиться на расстояние, при котором энергия взаимного притяжения превысит энергию теплового движения.

Обычно стабилизацию магнитных частиц проводят, добавляя определенное количество соответствующего

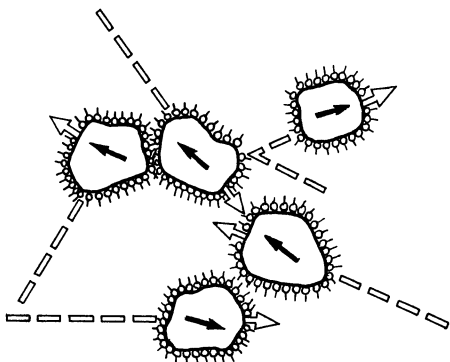


Рис. 18. Мономолекулярный слой на магнитных частицах.

поверхностно-активного вещества в небольшой объем носителя. В результате образуется магнитная паста, которая может быть затем растворена в любом количестве жидкого носителя, что позволяет плавно дозировать содержание твердой фазы в магнитном коллоиде. Причем магнитный концентрат, как и хорошо известные пищевые концентраты, занимает при хранении мало места и в любой момент может быть заправлен в соответствующий «бульон».

Нам осталось упомянуть о некоторых отработанных приемах в производстве магнитных жидкостей. Один из них состоит в осаждении частиц, покрытых поверхностно-активным веществом, из раствора при добавлении в него специального полярного вещества, молекулы которого ослабляют взаимодействие адсорбционного слоя и несущей неполярной среды. Когда частицы приближаются друг к другу, жидкая основа вытесняется из зазоров между ними; частицы объединяются в агрегаты и оседают, сохраняя адсорбционный слой поверхностно-активного вещества. Далее эти

частицы могут быть переведены в другую несущую среду, имеющую химическое сродство к веществу; адсорбированному на поверхности частиц.

Существует другой способ заставить осесть частицы, покрытые адсорбционным слоем. Этот процесс осуществляется специально подобранным полимером, у которого молекулы настолько длинные, что «связывают» сразу несколько частиц. После выделения из раствора частицы взвешивают в новом носителе.

Однако таким путем можно заменять несущие среды только одного класса, например один углеводород на другой. Конечно, отработка этих способов была шагом вперед в расширении круга магнитных жидкостей. Основы, которые по причинам непринципиального характера использовать не удавалось, с появлением новой методики «заработали». Но ученым хотелось использовать идею, заключенную в этих способах, для получения магнитных жидкостей на любых основах, в том числе тех, на которых синтез магнитных жидкостей вообще не удавался. Многочисленные исследования привели к желаемому результату. Из первичной магнитной жидкости выводят в осадок магнитные частицы без адсорбированного на них стабилизатора, который растворяется специальным агентом. После промывки и сушки чистые частицы переводят с помощью другого стабилизатора в новый носитель. Кроме того, случай помог выявить интересную разновидность этого способа. Заменяв стабилизатор, исследователь по ошибке стал проводить взвешивание частиц снова в первичной основе. Что же случилось? Такое, казалось бы, бессмысленное удлинение процесса привело к значительному улучшению характеристик первичной магнитной жидкости. Как видите, научная деятельность вовсе не ограничена жесткими рамками очевидной целесообразности и оставляет место для случая.

РАВНЯЙСЬ, СМІРНО!

Естественно, что все отличия и преимущества магнитных жидкостей по сравнению с обычными коллоидами связаны с действием внешнего магнитного поля. Поместим малый объем магнитной жидкости (содержащей, как мы уже знаем, огромное число хаотически ориентированных микроскопических «магнитных стрелок») в однородное магнитное поле. Стрелки выравниваются в шеренги, совпадающие с силовыми линиями поля. Но команду «Смирно!» подавать рано, так как в строю наблюдаются какие-то колебания. Причина этого — тепловое движение. Энергия нарушителя порядка составляет kT , а энергия взаимодействия магнитного момента частицы с полем равна mH . Чтобы охарактеризовать соотношение между ориентирующим действием поля и тепловыми возмущениями, вводят параметр $mH/(kT)$. Под действием поля микроскопические магниты выстраиваются в определенном направлении, их элементарные магнитные поля складываются и жидкость, как намагниченный твердый стержень, приобретает магнитный момент — становится намагниченной. Что можно сказать о ней?

Тепловое движение приводит к тому, что намагниченность жидкости оказывается несколько меньше, чем намагниченность твердого материала, содержащегося в единичном объеме. Однако с ростом приложенного поля наблюдается тенденция к насыщению, т. е. намагниченность жидкости перестает зависеть от поля и приближается к $M_0 = nm$. Соотношение, описывающее равновесные магнитные свойства подобной системы частиц, было получено французским физиком Полем Ланжевром для молекул парамагнитного газа. Эта зависимость оказалась справедливой и для взвешенных однодоменных частиц. Правда, различие меж-

ду этими системами существует, и состоит оно в большем магнитном моменте каждой твердой частицы (помните термин «суперпарамагнетизм»?) и зависимости намагниченности домена от температуры.

Каковы же механизмы установления равновесной ориентации магнитных моментов после включения поля? Один из них связан с тепловыми скачками магнитного момента \mathbf{m} в самой частице, если она достаточно мала. Как только энергия теплового движения станет соизмеримой с энергетическим барьером, разделяющим разные направления предпочтительного положения магнитного момента в кристалле (вдоль оси легкого намагничивания), произойдет самопроизвольный поворот момента. «Высота» этого барьера составляет $K_a V$ (K_a — константа анизотропии кристалла; V — объем частицы). Если $K_a V / (kT)$ окажется меньше единицы, то за очень короткое время (порядка 10^{-9} с) магнитный момент частицы выстроится по полю, т. е. вращение магнитного момента проходит независимо от положения частицы (этот процесс намагничивания называется *неелевским* по имени французского физика Л. Нееля). Отсюда путь для получения магнитных жидкостей очевиден: следует уменьшать объем частицы и выбирать магнитные кристаллы с малым значением K_a .

Теперь предположим, что магнитный момент жестко связан с телом частицы. Как говорят, он «вморожен» ($K_a V / (kT) > 1$). Кроме того, магнитное поле тоже не в силах «вращать» момент в частице: $K_a V \gg mH$. Но частица взвешена в жидкости и, сталкиваясь с ее молекулами, хаотически вращается и движется поступательно. Если наложить магнитное поле, намагничивание жидкости происходит именно в результате броуновского движения частиц (броуновский механизм намагничивания). Следовательно, время, за которое

установится равновесная ориентация магнитных моментов, примерно равняется времени, за которое коллоидная частица успевает повернуться в результате теплового движения. Это время зависит от вязкости жидкой основы. Для жидкостей на основе керосина или воды оно составляет приблизительно 10^{-7} с.

Как видите, система однодоменных частиц, взвешенных в жидком носителе, очень быстро намагничивается, и магнитный момент жидкости становится параллельным внешнему полю.

Мы рассмотрели процесс намагничивания покоящейся магнитной жидкости. Что изменится в случае движения жидкости? Для ответа на этот вопрос обратимся к течению вязкой жидкости. Выделим в объеме жидкости прямоугольную призму и предположим, что к верхней ее грани приложена постоянная сила F , направленная вдоль нее. Под действием этой силы самый верхний горизонтальный слой жидкости переместится на расстояние Δl за промежуток времени Δt — произойдет деформация призмы. Скорость каждой частицы в этом слое равна $\Delta l / \Delta t$. Чем ближе к неподвижному основанию слой, тем ниже его скорость (меньше Δl). Если подобная картина справедлива для всей жидкости, то говорят, что она находится в состоянии однородного сдвига (деформационное движение происходит по параллельным прямым). Относительное движение слоев жидкости в элементарной призме приводит прежде всего к внутреннему трению между ними. Оно является причиной сопротивления действию внешней силы, поддерживающей стационарное течение жидкости, и называется *вязкостью*.

Разговор о вязкости магнитной жидкости пойдет чуть позже, а пока для нас важно понять, что при однородном сдвиге каждая твердая частица закручивается потоком. Действительно, в рассмотренной выше жидкой

призме скорость верхней части сферической частицы больше, чем нижней, и частица как бы «катится» вдоль границы между отдельными слоями жидкости. Если магнитный момент не связан с телом частицы, то движение жидкости никак не повлияет на выстраивание магнитных моментов в направлении внешнего поля. А вот при «вмороженном» моменте течение жидкости может препятствовать установлению равновесной ориентации моментов. Это явление называется *гидродинамическим размагничиванием*. Оно должно учитываться в тех устройствах, в которых течение магнитной жидкости происходит в узких зазорах и с очень высокой относительной скоростью между отдельными слоями. Такие устройства широко применяются в машиностроении, и о них рассказ еще впереди.

Мы уже упомянули об одной из важнейших характеристик жидкой среды — вязкости. *Коэффициент сдвиговой вязкости* η — это коэффициент пропорциональности между *напряжением* (так называют отношение силы F к площади поверхности) τ на верхней границе жидкой призмы высотой h и величиной v_0/h , в которой $v_0 = \Delta l / \Delta t$ — скорость перемещения верхней границы относительно неподвижной нижней. Соотношение

$$\tau = \eta \frac{v_0}{h},$$

справедливое для медленного течения простых однородных жидкостей и газов, называется *законом внутреннего (вязкого) трения Ньютона*, а среды, подчиняющиеся этому закону, — *ньютоновскими*. Коэффициент сдвиговой вязкости η зависит от типа жидкости, температуры и сравнительно слабо от давления. Отношение v_0/h — *скорость сдвига*. Оно показывает, как быстро изменяется во времени величина $\Delta l/h$, называемая *деформацией сдвига*. Физически закон внутреннего тре-

ния Ньютона означает, что для поддержания движения верхней границы с постоянной скоростью v_0 к ней нужно приложить силу, пропорциональную площади границы и скорости сдвига, чтобы уравновесить вязкое сопротивление жидкости. Работа этой силы полностью переходит в теплоту, поэтому обычно говорят о *вязкой диссипации* (рассеянии) энергии в вязком потоке.

Вернемся, однако, к магнитным жидкостям. Как повлияет на вязкость присутствие твердых коллоидных частиц в жидкости? Ясно, что к внутреннему трению в жидкости добавится еще трение жидкости о частицы. Первая теоретическая модель течения среды со взвешенными сферическими частицами принадлежит Альберту Эйнштейну. Результирующая формула связывает вязкость смеси η , сдвиговую вязкость жидкого носителя η_0 и объемную концентрацию твердых частиц φ :

$$\frac{\eta}{\eta_0} = 1 + \frac{5}{2} \varphi.$$

Объемная концентрация показывает относительное содержание твердой фазы в единичном объеме среды ($\varphi = nV$) без учета адсорбционных слоев на частицах. Эта формула справедлива для очень малых концентраций, когда можно считать возмущения, вносимые отдельной частицей, несущественными для условий обтекания других частиц. Чтобы быть точным, надо увеличить диаметр каждой сферы на удвоенную толщину адсорбционного слоя. Тогда объем каждой частицы $V_h = \pi(d + 2\delta)^3/6$. Соответственно увеличится в формуле Эйнштейна и объем, занимаемый сферическими частицами. С увеличением концентрации частиц их влияние на вязкость коллоида растет. Имеются формулы, учитывающие присутствие множества частиц.

Назовем такое увеличение вязкости коллоидного раствора по сравнению с вязкостью жидкой основы *концентрационной вязкостью*. Все наши рассуждения не были связаны пока с магнитными свойствами частиц и справедливы для любых невзаимодействующих сфер.

В действительности каждая сферическая частица обладает магнитным моментом $m = \pi d^3 M_d / 6$. Если температура жидкости намного ниже температуры Кюри, при которой самопроизвольная намагниченность исчезает, то внешнее магнитное поле увеличивает вязкость, воздействуя на магнитные моменты. Покажем, как это происходит. Мы уже знаем, что при сдвиге течения твердая частица свободно «катится» в жидкости. Вместе с нею вращается и ее магнитный момент. Магнитное поле стремится удержать момент частицы, как только он начинает отклоняться от направления силовых линий. «Заторможенная» частица задерживает обтекающие ее струйки жидкости, и нужно увеличить внешнюю силу, чтобы уравновесить это сопротивление. В результате диссипация энергии растет, что эквивалентно увеличению вязкости системы. Эту добавку называют *вращательной вязкостью*. Она появляется, разумеется, лишь в тех случаях, когда магнитный момент связан с телом частицы.

Есть еще одно обстоятельство, подлежащее учету: магнитные моменты могут взаимодействовать и друг с другом. Напомним, что магнитное взаимодействие двух взвешенных частиц пропорционально объему частиц, и, следовательно, всегда можно добиться отсутствия связанных «коллективов», уменьшая размеры частиц. Тем не менее в сильных магнитных полях ($mH \gg kT$) частицы вынуждены выстраиваться в шеренги, параллельные полю. Когда частиц в жидкости так много, что они практически касаются друг друга, тепловое движение не в состоянии разбросать их на

большие расстояния. Взаимодействие между магнитными моментами частиц в высококонцентрированных жидкостях должно также сказываться на вязкости. Представьте себе, что отдельные слои в рассмотренной ранее жидкой призме «сшиты» нитями из магнитного материала. Тогда, кроме трения слоев друг о друга, нужно преодолеть сопротивление постепенно растягивающихся нитей. Таков третий механизм, увеличивающий *эффективную вязкость* магнитных жидкостей. Используя слово «эффективная», мы хотим подчеркнуть, что коэффициент сдвиговой вязкости, введенный около 300 лет назад, относился только к трению слоев жидкости при сдвиговом течении. Теперь же обсуждаются иные механизмы увеличения внутреннего трения, повышающие диссипацию механической энергии в жидкости. Совместное действие всех механизмов мы объединяем понятием «эффективная вязкость».

Существует особая наука — *реология*, изучающая законы течения жидкостей, поведение которых значительно отличается от поведения жидкостей ньютоновских. Эти жидкости иногда так и называются *неньютоновскими* или *реологическими*. Их течение описывается более сложными соотношениями по сравнению с законом внутреннего трения Ньютона.

Таким образом, эффективная вязкость магнитных жидкостей определяется несколькими факторами. В зависимости от концентрации магнитного материала основную добавку к сдвиговой вязкости носителя дает тот из них, который является преобладающим. Например, до концентраций магнетита в керосине $\varphi = 0,1$ магнитные жидкости неньютоновских свойств не проявляют; эффективная вязкость определяется только торможением частиц в поле и концентрационным механизмом. Начиная с $\varphi = 0,2$ вклад диполь-

дипольного взаимодействия в процессы диссипации становится основным. Что означает концентрация $\varphi=0,2$? Много это или мало?

Пусть у нас залито в пробирку 100 см^3 магнитной жидкости. В этом объеме 20% , т. е. 20 см^3 , составляет твердый магнетик. Следовательно, намагниченность жидкости в сильном магнитном поле всего лишь в 5 раз меньше, чем магнитного материала того же объема. Что касается объема, занятого жидким носителем, то он гораздо меньше 80 см^3 . Причина заключается в адсорбционных слоях на каждой частице, из-за которых объем частицы возрастает и так называемая гидродинамическая концентрация φ_h в 2—2,5 раза превышает φ . Теперь становится понятным сильное влияние поля соседних частиц на эффективную вязкость при $\varphi > 0,2$. Переходя к гидродинамической концентрации, получаем $\varphi_h \approx 0,50$, т. е. мы приближаемся к максимально возможной концентрации, когда сферы плотно упакованы и касаются друг друга: $\varphi_h^{\text{кр}} = 0,74$. Никакой жидкости, правда, при этом не существует, и вязкость такой системы будем считать бесконечно большой величиной.

Следовательно, в высококонцентрированных магнитных жидкостях частицы «стеснены» своими соседями и взаимодействие их магнитных моментов начинает сказываться на внутреннем трении даже при отсутствии внешнего поля. Так что, стремясь получить жидкость с сильными магнитными свойствами, мы одновременно будем увеличивать вязкость такой системы по сравнению с жидкой основой.

Таково влияние сил вязкости на процессы переноса жидких объемов в текущей жидкости. Другой, не менее важный процесс переноса, происходящий без видимого перемещения вещества, связан с передачей теплоты от нагретой части тела к холодной. Этот процесс назы-

вают *теплопроводностью*. Нельзя сказать, что движения здесь совсем нет. Только происходит оно на молекулярном уровне: более «горячие» молекулы (это более быстрые частицы) расталкивают своих менее подвижных соседей, передавая им энергию молекулярного движения, среднее значение которой и называют теплотой. В неподвижных внешне жидкостях происходит, таким образом, перенос теплоты во всех участках, где существует неоднородность температуры. Французский математик и физик Жан Батист Фурье еще в XIX в. установил, что количество теплоты q , проходящее через площадку в 1 м^2 за секунду, пропорционально перепаду температуры ΔT , отнесенному к длине Δz — пути продвижения теплоты в направлении z , перпендикулярном к этой площадке:

$$q = \lambda \frac{\Delta T}{\Delta z}.$$

Коэффициент пропорциональности λ называется *коэффициентом теплопроводности*. Эта характеристика жидкости чрезвычайно важна при расчете количества передаваемой теплоты в самых разнообразных процессах и аппаратах, например в химических производствах, металлургии, на тепловых станциях, словом, всюду, где происходит нагрев.

Для магнитных жидкостей, образованных жидкими компонентами и твердой фазой, коэффициент теплопроводности зависит от коэффициентов теплопроводности жидкой фазы и дисперсного материала, а также от количества этого материала, определяемого концентрацией ϕ . Влиянием магнитного поля на коэффициент теплопроводности в технических расчетах можно пренебречь. Дело в том, что упорядочение магнитных частиц в поле не может повлиять на предпочтительный перенос теплоты по цепочкам частиц, поскольку каждая из них облачена в защитную покрывку из поперх-

ностно-активного вещества, теплопроводность которого того же порядка, что и теплопроводность жидкого носителя.

Такой же результат получается, если измерять электрическую проводимость магнитной жидкости. Оказывается, что электрическая проводимость практически не зависит от магнитного поля, направленного либо параллельно, либо перпендикулярно к току в измерительной ячейке. Напомним, что удельная электрическая проводимость раствора есть количество электричества, переносимое через площадку в 1 м^2 в течение секунды при разности электрических потенциалов 1 В на длине 1 м . Носителями зарядов в жидкости, наченной магнитными частицами, являются ионы обоих знаков. Конечно, присутствие множества мельчайших частичек материала, который проводит электрический ток гораздо лучше, чем жидкая основа, ухудшает диэлектрические свойства магнитной жидкости. Например, электрическая проводимость магнитной жидкости на основе керосина (магнетит стабилизирован олеиновой кислотой) на три порядка (в 1000 раз) выше, чем электрическая проводимость керосина и олеиновой кислоты. Но она все же на десять порядков (в 10^{10} раз) хуже, чем у магнетита. Значит, перенос заряда происходит в основном по жидкой матрице! Тогда, увеличивая концентрацию магнитного материала в жидкости, мы будем увеличивать количество дипольных молекул поверхностно-активного вещества, заряженные концы которых собирают вокруг себя ионы противоположного знака. Эти ионы могут отрываться под действием электрического поля и двигаться к электродам. Опыты показали, однако, что удельная проводимость возрастает при росте концентрации только до определенного значения ($\varphi \approx 0,12$), а потом убывает. Такой же характер зависимости наблюдается

для электрической проводимости растворов электролитов. Там действует правило: электрическая проводимость электролита зависит как от числа ионов в единичном объеме, так и от их подвижности. Не будем заниматься попытками точно определить «подвижность» ионов, скажем только, что это характерная скорость движения ионов в электрическом поле единичной напряженности. При высоких концентрациях электрическая проводимость электролитов уменьшается из-за того, что противоположно заряженные ионы начинают притягиваться и подвижность их падает.

Почему бы не применить эти выводы к магнитным жидкостям? Здесь тоже, начиная с некоторых концентраций, заряженные «шубы» своими электрическими полями могут затруднять продвижение между ними ионов и, таким образом, уменьшать электрическую проводимость. Действительно, с приближением к плотной упаковке сфер «тропинки», по которым могут перемещаться заряды, становятся все уже и извилистей. К тому же каждая частица создает невидимую, но чувствительную преграду.

Большинство других физических свойств магнитных жидкостей подчиняется так называемому *правилу смешения*, когда складываются произведения объемной доли каждого из компонентов магнитной жидкости на присущее ей значение характеристики. Например, для плотности (массы единичного объема жидкости) справедливо соотношение

$$\rho = \rho_m \varphi + \rho_{ж} (1 - \varphi),$$

где ρ_m — плотность магнитного материала; $\rho_{ж}$ — плотность жидкой фазы. По этому соотношению очень просто определить концентрацию φ магнитного материала в жидкости. Получив магнитную жидкость,

заливаем ее в тарированную колбочку, масса которой известна. После взвешивания колбочки с жидкостью, разделив массу жидкости на залитый объем, довольно точно определяем ρ . Колбочка для измерений такого рода называется *пикнометром*. Так же легко находим плотность жидкой фазы. Плотность магнитного материала является известной величиной, отыскать которую можно по таблицам физических величин.

Другой способ определения объемной концентрации микроскопических магнитов связан с магнитными измерениями. Измерив намагниченность насыщения жидкости M_0 и сравнив ее с намагниченностью насыщения твердой фазы, найдем $\varphi = M_0/M_s$. Обычно эти два способа дают разные результаты, причем концентрация, найденная по магнитным измерениям, оказывается ниже концентрации, полученной в результате плотностных измерений. Это расхождение может иметь несколько объяснений, одно из которых связано с возможным уменьшением магнитного диаметра частицы на удвоенную толщину поверхностного слоя, который становится немагнитным при хемосорбции поверхностно-активного вещества. Другое объяснение, отрицаящее первое, основывается на локальном искажении магнитного поля частицы ее «шубой», так что сохраняется большой угол между направлением магнитного момента частицы и внешним полем даже в очень сильных полях. Следовательно, при определении концентрации по измерениям намагниченности в числителе мы подставляем заниженное значение M_0 .

КОМУ НУЖНА МНИМАЯ ЧАСТЬ!

Мы видели, что с увеличением приложенного магнитного поля возрастает намагниченность магнитной жидкости, причем темп этого возрастания зависит от

напряженности намагничивающего поля (как и для твердого ферромагнетика). Количественная связь между намагниченностью и полем, как уже говорилось ранее, определяется магнитной восприимчивостью, которая в статических магнитных полях равна отношению создаваемой полем намагниченности к его напряженности.

Вы, наверное, обратили внимание на отмеченную характеристику приложенного поля. Конечно, она приведена не случайно. Все дело в том, что значения *статической* и *динамической восприимчивостей* (которые называют так по виду магнитного поля) не совпадают, причем совершенно ясно, что динамическая восприимчивость (в переменном поле) должна быть меньше, так как в процессе перемагничивания вещества часть энергии магнитного поля рассеивается вследствие существования необратимых процессов, которые уже обсуждались на страницах нашей книги, когда рассматривалось явление гистерезиса в ферромагнетике. Только теперь, кроме диссипативных процессов, происходящих в твердой фазе, нужно учитывать также вязкую диссипацию энергии, связанную с поворотом частиц в жидкой основе. В результате действующее на жидкость поле становится меньше, чем в статическом случае, а восприимчивость, как нам уже известно, в малых полях пропорциональна напряженности поля. Кроме того, конечная скорость намагничивания жидкости, характеризуемая τ — временем релаксации намагниченности, приводит к отставанию намагниченности по фазе от переменного поля. Это отставание от изменяющегося во времени по закону $H = H_0 \cos \omega t$ поля (которое называется *гармоническим*, как и колебания любых физических величин, описываемые законом косинуса или синуса) учитывается в соотношении

$$M = |\chi| H_0 \cos (\omega t - \delta)$$

величиной δ , равной разности фаз между колебаниями намагниченности и магнитного поля.

В достаточно малых магнитных полях динамическую магнитную восприимчивость удобно представить в комплексной форме:

$$\chi = \chi' - i\chi'',$$

где член χ' характеризует обратимые процессы намагничивания, а χ'' — процессы рассеяния энергии магнитного поля (необратимые процессы) при изменении вектора намагниченности.

При низких частотах изменения поля ($\omega \ll 1/\tau$) направление \mathbf{M} изменяется практически одновременно с \mathbf{H} , т. е. $\delta = 0$. Соответствующее значение χ' обычно обозначается χ_0 . На высоких частотах ($\omega \gg 1/\tau$) вектор намагниченности не успевает «следовать» за \mathbf{H} и χ' в этом случае обозначают χ_∞ . В области $\omega \sim 1/\tau$ происходит монотонное изменение χ' от χ_0 до χ_∞ (область дисперсии), а зависимость $\chi''(\omega)$ проходит через максимум при $\omega\tau = 1$.

В вышеприведенной формуле для χ символ i означает число особого рода, квадрат которого равен -1 , т. е. $i = \sqrt{-1}$. Это число называют *мнимой единицей*, а часть комплексного числа при ней — *мнимой частью* (от французского слова *imaginaire* — мнимый). Название «мнимые числа» ввел в 1637 г. французский математик и философ Рене Декарт, а широкое употребление символа $i = \sqrt{-1}$ началось благодаря трудам Карла Фридриха Гаусса (1831 г.). Одновременно с Гауссом датчанин Каспар Вессель и швейцарец Жан-Робер Арган предложили изображать комплексные числа $z = a + bi$ точкой на координатной плоскости (a, b — действительные числа). Применительно к магнитной восприимчивости такие графики называют иногда *диаграм-*

мами Аргана. Они отображают зависимость мнимой части комплексной магнитной восприимчивости χ'' от действительной χ' . Вектор, соединяющий начало координат диаграммы с каждой экспериментальной точкой, нанесенной на плоскость χ' , χ'' , позволяет определить модуль комплексного числа $|\chi|$:

$$|\chi| = \sqrt{\chi'^2 + \chi''^2}$$

(очевидно, что эта величина равна длине вектора) и его аргумент δ (равный углу, образуемому вектором с положительным направлением оси абсцисс, на которой откладывается χ'). Нетрудно представить такой график, по каждой точке которого можно рассчитать $|\chi|$ и δ , что дает количественную информацию как об амплитудном значении намагниченности (длина вектора), так и об ее отставании по фазе от намагничивающего поля (величина угла δ). Кроме того, по значению частоты, соответствующему максимуму мнимой части восприимчивости, легко найти время установления равновесной намагниченности τ , а также оценить механизм этого процесса, который называется *релаксационным*. Если время релаксации намагниченности определяется вязкостью жидкой основы, то это означает, что механизм релаксации связан с вращением частиц в жидкой основе (так называемый *медленный механизм*). *Быстрый механизм* релаксации намагниченности, как мы уже знаем, определяется тепловыми поворотами магнитного момента в каждой частице. Соотношение между быстро и медленно релаксирующими компонентами находят по точкам пересечения диаграммой Аргана оси абсцисс (χ_∞ и χ_0). Разность $\chi_0 - \chi_\infty$ характеризует спектр времени релаксации для медленной компоненты. В случае $K_a V / (kT) \ll 1$ диаграмма «стягивается» в точку с координатами $\chi' = \chi_0$, $\chi'' = 0$, которая соответствует

быстрому механизму релаксации намагниченности. Наоборот, в случае «вмороженного» в частицу момента ($K_a V / (kT) \gg 1$) отношение χ_0 / χ_∞ увеличивается, так как вклад быстрого механизма в установление намагниченности становится незначительным ($\chi_\infty \rightarrow 0$).

Измерения динамической магнитной восприимчивости показали, что экспериментальные диаграммы не являются полными полуокружностями, как следует из теории. Это объясняется полидисперсностью частиц в магнитной жидкости, в то время как классическая теория строилась для крупных однодоменных частиц одинакового размера. Мы еще раз видим, что теоретическая модель должна предсказывать главные отличительные особенности, а не второстепенные детали. В данном случае опыты подтвердили справедливость предположения о применимости формул, выведенных голландским физиком Петером Иозефом Вильгельмом Дебаем для частотной зависимости комплексной диэлектрической проницаемости растворов электрических диполей в жидкостях и твердых телах, и для описания комплексной магнитной восприимчивости магнитных жидкостей. В то же время существование в магнитной жидкости нескольких независимых механизмов релаксации, связанное с полидисперсностью частиц, которая приводит к разной «высоте» энергетических барьеров между положениями устойчивого равновесия магнитного момента в однодоменных частицах, также оказывает влияние на характеристики дисперсии магнитной восприимчивости.

Ранее уже рассматривалось воздействие случайных толчков на положение магнитного момента одиночной частицы в процессе намагничивания. Естественно, что магнитная восприимчивость должна увеличиваться с понижением температуры вследствие уменьшения интенсивности таких толчков, которые препятствуют

выстраиванию магнитных моментов вдоль магнитного поля. Но не следует забывать, что с понижением температуры ощутимо растет вязкость жидкой основы, а вязкость определяет вращательную подвижность самих твердых частиц. Поэтому при понижении температуры магнитная восприимчивость при воздействии переменного поля на жидкость должна уменьшаться, так как частицам становится «труднее» поворачиваться вслед за полем. В результате взаимодействия этих двух противоположных тенденций действительная часть магнитной восприимчивости χ' достигает максимального значения при некоторой температуре T_* , которая, как оказалось, зависит от частоты магнитного поля:

$$T_* \sim (\lg(\omega\tau))^{-1}.$$

Итак, наблюдаемую температурную зависимость магнитной восприимчивости легко объяснить, если вспомнить о двух механизмах (броуновском и неелевском) релаксации намагниченности жидкости.

КОГДА В ТОВАРИЩАХ СОГЛАСИЕ ЕСТЬ...

Нам уже приходилось рассматривать взаимосвязь электрических и магнитных характеристик атомного мира, чтобы прояснить природу ферромагнетизма. Однако сейчас давайте «поднимемся» на другой уровень характерных размеров и опишем причины так называемого *магнитодиелектрического эффекта*, наблюдаемого в магнитных жидкостях. О чем говорит название эффекта? Конечно, о связи между магнитными и диэлектрическими характеристиками твердых частиц. Частицы определяют этот эффект прежде всего потому, что являются носителями магнитного момента, и в то же время в электрическом поле они становятся электрическими диполями.

Теперь читателю, наверное, ясно, что магнитоди-электрический эффект возникает при совместном воздействии двух полей: магнитного и электрического. Мы уже знаем о «согласии» между законами, описывающими магнитные и электрические явления. Магнитная жидкость оказалась такой средой, в которой проявилась новая грань «согласия» между магнетизмом и электричеством. Отметим, что относительная диэлектрическая проницаемость дисперсной фазы в магнитной жидкости значительно выше, чем проницаемость используемых жидких основ. По этой же причине не учитывается присутствие в жидкости полярных молекул поверхностно-активного вещества, также незначительно влияющего на диэлектрическую проницаемость всей магнитной жидкости.

Итак, причин для *анизотропии* (так называют зависимость свойств от направления в пространстве) каждой частицы три: магнитная анизотропия, связанная с существованием предпочтительного направления магнитного момента; электрическая анизотропия, обусловленная ее электрическим дипольным моментом; анизотропия формы частицы, которая характеризуется стерическим дипольным моментом. Надо сразу сказать, что магнитные жидкости представляют собой пример согласованности действий различных сил. Предположим, что мы наложили однородное магнитное поле, которое по известному закону выстраивает магнитные моменты частиц. Но это означает и упорядочение направлений электрических диполей, тоже связанных с частицами. Следовательно, внешним магнитным полем можно управлять диэлектрическими характеристиками магнитной жидкости. Напомним, что электрическая поляризация магнитной жидкости складывается из электрической поляризации диспергированных в ней твердых частиц. Ясно, что так называемая магнито-

диэлектрическая анизотропия, которая характеризует изменение диэлектрической проницаемости магнитной жидкости при измерениях в однородном магнитном поле, направленном параллельно и перпендикулярно к наложенному переменному электрическому полю, должна зависеть от концентрации этих частиц. Кроме того, определяющее значение имеет напряженность магнитного поля, а также связь между магнитным моментом и частицей, которую, как мы уже знаем, можно оценить по отношению $K_a V / (kT)$. Проведенные эксперименты подтвердили предсказания теории и дополнительно выдвинули альтернативную причину наблюдаемого эффекта — выстраивание частиц в цепочки.

ЛУЧ СВЕТА В ТЕМНОМ СЛОЕ

О том, что свет представляет собой электромагнитные волны, известно еще со времен Джеймса Клерка Максвелла — английского физика, который в 1860—1865 гг. разработал теорию электромагнитных волн и описал законы их распространения. Физические явления, наблюдаемые при взаимодействии с веществом коротких электромагнитных волн, длина которых лежит в интервале $10^{-4} — 10^{-9}$ м, относят к оптике. В указанном интервале имеется весьма узкий (по сравнению с известным спектром электромагнитных волн) участок длин волн от $4 \cdot 10^{-7}$ до $7 \cdot 10^{-7}$ м, которые воспринимаются человеческим глазом. В зависимости от длины волны (частоты), попадающей на сетчатку глаза, человек различает цвета и живет в цветном, а не в черно-белом мире.

Казалось бы, нет ничего удивительного в том, что свет, проходя через намагниченное вещество, изменяет свои характеристики: ведь бегущая электромагнитная волна, состоящая из переменных во времени и про-

странстве электрического \mathbf{E} и магнитного \mathbf{B} полей, должна испытывать влияние магнитного момента среды. Какие же характеристики световой волны поддаются контролю со стороны исследователя? Не прибегая к специальным устройствам, можно судить о частоте, с которой изменяются во времени \mathbf{E} и \mathbf{B} , т. е. о цвете, а также об интенсивности света, пропорциональной величинам E^2 и B^2 . Существуют и другие параметры световой волны, измерить которые способны только специальные приборы. Один из таких приборов называется *анализатором*. Он используется для определения поляризационных характеристик, с его помощью получают поляризованный свет (в этом случае прибор называют *поляризатором*).

Рассмотрим теперь, чем поляризованный свет отличается от неполяризованного. Чтобы ответить на этот вопрос, вспомним, что в излучаемой электромагнитной волне векторы электрического и магнитного полей перпендикулярны друг к другу и лежат в плоскости, перпендикулярной к направлению распространения. Если бы мы обладали способностью следить за колебаниями вектора \mathbf{E} , то для обычных источников света (например, электрических ламп накаливания) нам бы не удалось обнаружить никакого порядка: направление колебаний хаотически изменялось бы по ходу волны. Такой свет называется *неполяризованным* или *естественным*. Выяснив, что такое неполяризованный свет, можно предположить, что в поляризованном свете колебания вектора электрического поля подчиняются какой-то закономерности. Пусть эти колебания происходят лишь в одной плоскости, проходящей через направление распространения световой волны. Тогда говорят, что свет *линейно поляризован*. Если вектор \mathbf{E} при распространении световой волны, например вдоль оси z , постепенно поворачивается в плоскости, перпен-

дикулярной к оси z , по мере распространения волны, то такую волну называют *поляризованной по кругу* или *циркулярно поляризованной*. При этом концы вектора \mathbf{E} будут располагаться на винтовой линии, для которой ось z является осью симметрии. В зависимости от направления вращения вектора \mathbf{E} (если смотреть навстречу волне) различают *левую круговую поляризацию* (вращение против часовой стрелки) и *правую* (вращение по часовой стрелке). Такую картину можно представить как результат наложения двух волн, которые линейно поляризованы в двух взаимно перпендикулярных направлениях и имеют одинаковые амплитуду и частоту при разности фаз $\pi/2$. В общем случае вектор напряженности электрического поля вращается в плоскости $z = \text{const}$, одновременно изменяясь периодически по величине, так что его конец описывает эллипс.

Эллиптическая поляризация представляет собой наиболее общий вид поляризации монохроматической волны (в которой векторы \mathbf{E} и \mathbf{B} совершают гармонические колебания одинаковой частоты). При определенных условиях эллиптическая поляризация переходит в линейную или круговую поляризацию.

Все, что говорилось о поведении вектора \mathbf{E} в волне, можно отнести и к вектору \mathbf{B} , так как в электромагнитной волне векторы \mathbf{E} и \mathbf{B} в любой момент и в любой точке пространства взаимно перпендикулярны, а связь между ними описывается уравнениями, полученными Максвеллом и названными его именем.

Теперь расскажем о явлении, которое можно наблюдать на кристалле исландского шпата — *двойном лучепреломлении*. Если на естественную грань достаточно толстого кристалла исландского шпата направить по нормали узкий пучок света, то из противоположной грани выйдут уже два луча, имеющих направ-

ления, параллельные первоначальному. При этом один из них будет продолжать направление падающего луча, а второй сместится в сторону, т. е. для него угол преломления будет отличен от нуля, хотя угол его падения на грань кристалла равен нулю. Это обстоятельство, по-видимому, и обусловило название луча — *необыкновенный*, в то время как луч, подчиняющийся закону преломления Снеллиуса, называют *обыкновенным*.

Направив выходящие из кристалла лучи на экран, можно убедиться в том, что они пространственно разделены (образуют два пятна), а с помощью анализатора — в том, что они линейно поляризованы во взаимно перпендикулярных направлениях. С этой целью начнем вращать анализатор вокруг направления выходящих лучей. Поворачивая анализатор на некоторый угол, можно полностью погасить один из них, а пропускать только второй, что означает совпадение направления поляризации второго луча с направлением пропускания анализатора. Повернув затем анализатор на угол $\pi/2$, мы обнаружим, что теперь проходит лишь первый луч. Такой опыт доказывает, что обыкновенный и необыкновенный лучи поляризованы во взаимно перпендикулярных направлениях.

Мы много говорили о кристалле исландского шпата, который со времени открытия Эразма Бартолини двойного лучепреломления (1670 г.) используется для изучения и демонстрации этого явления. Картина будет неполной, если не упомянуть о том, что в кристалле существует направление, вдоль которого отсутствует двойное лучепреломление. Оно называется *оптической осью кристалла*. Исландский шпат и другие кристаллы, обладающие одной оптической осью, относятся к *оптически одноосным*. Следует отметить, что существуют также кристаллы, имеющие два таких направления, — *двухосные кристаллы*.

Для полноты картины упомянем также кристаллы, в которых один из лучей поглощается сильнее другого. Это явление называется *дихроизмом*.

Столь обширный экскурс в оптику, возможно, вызвал у читателя недоуменный вопрос: а причем здесь магнитная жидкость? Все дело в том, что и двойное лучепреломление, и вращение плоскости поляризации света, проходящего через вещества, называемые естественно оптически активными, связаны с их анизотропией, физическая причина которой лежит в строении этих веществ. Следовательно, пропустив свет через магнитную жидкость, можно добыть информацию об особенностях ее структуры.

Выше речь шла об анизотропии, которая определяется природными свойствами веществ. В магнитных жидкостях, как уже, наверное, читателю стало ясно, такую анизотропию создают искусственно с помощью внешнего магнитного поля, которое ориентирует твердые частицы. Наблюдаемое при этом двойное лучепреломление (эффект Коттона — Мутона) объясняется образованием в слое жидкости непрерывных цепей из твердых частиц, магнитные моменты которых направлены вдоль поля.

Взаимодействие света и магнитной жидкости можно отнести к разделу оптики, в котором изучается взаимодействие электромагнитных волн и ультрадисперсного вещества со структурой, изменяемой магнитным полем. В связи с тем что твердые частицы поглощают и рассеивают проходящий свет (это явление ослабления света называют *экстинкцией*), все упомянутые оптические исследования проводят на очень тонких слоях магнитной жидкости.

Существует также ряд оптических эффектов при отражении падающего света от поверхности намагниченного образца. Так, направляя линейно поляризо-

ванный свет на поверхность намагниченной жидкости, можно наблюдать эллиптическую поляризацию отраженного света, причем большая ось эллипса поляризации поворачивается на некоторый угол по отношению к плоскости поляризации падающего света. В том случае, когда вектор намагниченности жидкости был перпендикулярен к плоскости падения пучка света и параллелен отражающей поверхности, изменялась только интенсивность отраженного света, а поворота плоскости поляризации не происходило. Объяснение наблюдаемых эффектов также связано с образованием в магнитной жидкости агрегатов, состоящих из твердых частиц.

В заключение отметим, что высокая оптическая активность магнитной жидкости позволяет создавать на ее основе магнитооптические устройства, такие, как световые затворы, стабилизаторы для лазеров, магнитооптические преобразователи и др.

КАК ВЫРАСТИТЬ ЕЖА

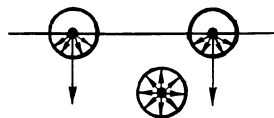
С магнитной жидкостью в поле происходят и другие превращения, которые заинтересовали ученых, изучавших ее свойства. Поскольку далее разговор пойдет о свободной поверхности магнитной жидкости, сначала коротко напомним о поверхности материалов вообще.

В последние годы физики стали серьезно изучать поверхность материалов. Наверное, главная причина такого внимания — запросы современной техники. Например, для микроэлектроники характерна общая тенденция к миниатюризации рабочих элементов, что приводит, естественно, к уменьшению их размеров и, следовательно, к возрастанию роли поверхности. Если материал жидкий, то на свободной поверхности допол-

нительно действуют эффекты *поверхностного натяжения*. Какова причина их появления?

Представим себе свободный слой жидкости в виде горизонтальной плоскости и рассмотрим взаимодействие молекул жидкости (рис. 19). На молекулы, расположенные в поверхностном слое, действуют силы притяжения (ван-дер-ваальсовы) со стороны многочисленных подобных им молекул жидкости в ее толще. Так как в парообразной фазе расположено гораздо меньше молекул, то силы, действующие на «поверхностные» молекулы и направленные внутрь жидкости, превышают силы, направленные вовне. Равнодействующая сила стремится втянуть молекулу поверхностного слоя во внутренние слои жидкости. Но расстояние между частицами остается неизменным вследствие ничтожно малой сжимаемости жидкостей, и в результате в поверхностном слое возникает сила, как бы сжимающая его. Эта сила, действующая в горизонтальной плоскости, сокращает все «излишества» на свободной поверхности жидкости, уменьшая ее площадь. Когда поверхность жидкости по какой-либо причине изогнута, то указанная сила направлена по касательной к элементу поверхности. Для количественной оценки ее относят к единице длины линии, расположенной на поверхности, и называют полученную величину *коэффициентом поверхностного натяжения* α . Единица коэффициента поверхностного натяжения — ньютон на метр.

Р и с. 19. Взаимодействие молекул жидкости.



Из сказанного следует, что для перемещения молекулы из толщи жидкости на поверхность необходимо произвести работу по разрыву части связей молекулы с окружающими ее соседями. Отсюда следует вывод,

что всякое увеличение свободной поверхности жидкости требует определенной работы. Это представление часто используют для определения коэффициента поверхностного натяжения как работы, необходимой для образования 1 м^2 новой поверхности жидкости, или, иначе, *свободной энергии* 1 м^2 поверхности жидкости. В этом случае коэффициент поверхностного натяжения жидкости выражается в джоулях на метр в квадрате ($1 \text{ Дж/м}^2 = 1 \text{ Н/м}$).

Известный нам принцип минимума свободной энергии вынуждает каплю под действием сил поверхностного натяжения принимать форму сферы. Сфера характеризуется тем, что из всех форм тела неизменного объема она обладает наименьшей поверхностью. Поэтому капля дождя сферической формы обладает наименьшей свободной поверхностной энергией по сравнению с каплями той же массы, но другой формы. Однако если присмотреться к капле ртути больших размеров, лежащей на столе, то мы заметим, что ее форма отличается от сферической. Причина этого заключается в том, что энергия капли, находящейся в поле силы тяжести, складывается из двух слагаемых, сумма которых должна быть минимальной:

$$W = \alpha S + mgh,$$

где h — высота центра масс капли.

В зависимости от объема капли главное значение приобретает одно или другое слагаемое. При увеличении объема масса шара возрастает быстрее, чем поверхность, так как масса пропорциональна кубу линейного размера (объему), а поверхность — только квадрату этой величины. Поэтому, начиная с некоторого объема, второе слагаемое, характеризующее потенциальную энергию в поле земного тяготения, приобретает большее значение, чем первое. Следовательно,

чтобы уменьшить W , капля принимает форму, соответствующую пониженному значению h . Из этого примера видно, что соотношение между поверхностным натяжением и весом определяет форму свободной поверхности, и никого не удивит тот факт, что ведро воды, пролитой на пол, растекается по нему, а не принимает форму футбольного мяча.

Займемся теперь дополнительным давлением в жидкости, обусловленным кривизной ее свободной поверхности. Натяжение, существующее в поверхностном слое капли, вызывает давление на внутрилежащие области жидкости, которое зависит от кривизны свободной поверхности. Действительно, чем меньше кривизна, тем на меньшую площадь действует компонент силы поверхностного натяжения, направленный к центру кривизны, и, значит, выше давление под изогнутой поверхностью жидкости. Если поверхность плоская, то все силы лежат в плоскости поверхностного слоя и дополнительное давление отсутствует. Просуммировав компоненты сил поверхностного натяжения, направленные внутрь капли, для давления в сферической капле радиусом R получим

$$p = 2\sigma/R.$$

Это соотношение носит название *формулы Лапласа*.

В более общем случае для определения давления под выпуклой поверхностью жидкости, имеющей разные радиусы кривизны, эту формулу можно записать так:

$$p = \sigma(1/R_1 + 1/R_2),$$

где R_1 , R_2 — радиусы кривизны поверхности в двух взаимно перпендикулярных нормальных сечениях.

Познакомившись с причинами возникновения поверхностных, или капиллярных, сил, нальем магнитную жидкость в стакан достаточных размеров, чтобы сила

тяжести во много раз превышала поверхностное натяжение. Не будем рассматривать явление на границе жидкости со стенками стакана (смачивает или не смачивает она стекло), чтобы считать равновесную поверхность плоской. Поместим теперь стакан в такое однородное вертикальное магнитное поле, чтобы намагниченность жидкости M превысила некоторое критическое значение, зависящее от плотности и коэффициента поверхностного натяжения жидкости. То, что мы увидим в стакане, показано на рис. 20. Не правда ли,

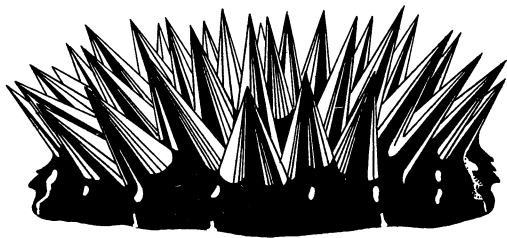


Рис. 20. Еж или цветок?

удивительно похоже на ежа (отсюда и название книги)? Или на цветок? Все зависит от вашей фантазии.

Почему же свободная поверхность, которая под действием сил поверхностного натяжения должна сокращать свою площадь, вдруг принимает такую экзотическую форму? Чтобы разобраться в этом, вспомним, что магнитная жидкость создает более благоприятные условия для прохождения магнитного потока, чем воздух (выше магнитная проницаемость, меньше «сопротивление» среды). Магнитные силовые линии стремятся найти путь, который можно было бы пройти с наименьшим сопротивлением, и дружно устремляются в области, заполненные магнитной жидкостью, если на другой дороге их ожидает воздух.

Теперь посмотрим, что происходит на первоначально горизонтальной свободной поверхности после включения однородного вертикального (нормального) магнитного поля.

В реальных физических условиях на ней неизбежно возникают самые различные случайные возмущения. Равновесная форма поверхности оказывается устойчивой, если все возмущения во времени затухают. Если же одно или несколько возмущений со временем нарастают, то их развитие приведет к тому, что равновесие будет нарушено и произойдет перестройка свободной поверхности, которая «выберет» устойчивую форму в данных условиях, соответствующую минимальной энергии.

Для суждения об устойчивости механического равновесия необходимо, таким образом, исследовать поведение во времени всевозможных возмущений. В *линейной теории устойчивости* рассматривают малые возмущения равновесия, зависящие от времени по экспоненциальному закону (так называемые «нормальные» возмущения). Границу устойчивости равновесия относительно данного возмущения находят из условий, при которых возмущение нейтрально: не затухает и не нарастает. Из нейтральной кривой для различных возмущений, разграничивающей области устойчивости и неустойчивости, находят характеристики «наиболее опасного» возмущения, приводящего раньше других к неустойчивости равновесного состояния. В частности, длина волны этого возмущения позволяет определить *периодичность* реализующейся формы поверхности (напомним, что длина волны — это расстояние между соседними максимальными значениями периодически изменяющейся в пространстве величины).

Пусть произошло случайное искривление свободной поверхности магнитной жидкости, находящейся в нор-

мальном магнитном поле. Внешнее поле вблизи возвышений увеличивается (силовые линии магнитного поля сгущаются), а на впадинах уменьшается (происходит соответствующее разрежение силовых линий) по сравнению с постоянным полем над плоской поверхностью. Возникающие неоднородности магнитного поля вытягивают возвышения и, наоборот, опускают впадины по известному принципу: намагниченное тело движется в область увеличивающегося поля. Таким образом, возмущения магнитного поля стремятся развить возмущения поверхности. Наоборот, силы тяжести и поверхностного натяжения, действующие на жидкость, препятствуют смещению участков поверхности. Однако коэффициенты пропорциональности, связывающие эти две силы с перемещением уровня поверхности (при малых искривлениях), зависят только от свойств жидкости и не зависят от напряженности поля. А вот для магнитной силы такой же коэффициент определяется не только свойствами жидкости (ее магнитной проницаемостью), но и квадратом напряженности магнитного поля. Поэтому всегда можно приложить такое поле, при котором дестабилизирующая магнитная сила превысит сумму стабилизирующих сил и наступит неустойчивость плоской поверхности, «иглы» вырастут так, что силы тяжести и поверхностного натяжения будут в состоянии компенсировать действие магнитной силы.

Мы рассуждали с точки зрения внешнего наблюдателя, «парившего» над поверхностью жидкости. Забравшись под поверхность со специальным датчиком давления, он мог бы рассказать приблизительно следующее. В момент случайного искривления поверхности давление вблизи возвышения стало падать по сравнению с давлением у боковых склонов. После образования «ежа» компенсация этого внутреннего перепада

давления произойдет за счет роста «иголок».

Чтобы объяснить результаты этого мысленного эксперимента, представим себе небольшой участок свободной поверхности, находящейся в нормальном однородном поле. В очень тонком поверхностном слое толщиной в одну твердую частицу (обозначим его h) напряженность внешнего поля изменяется от H_e в воздухе над поверхностью до H_i в жидкости. Значит, на границе раздела сред существует градиент напряженности

$$|\nabla H| = \frac{H_e - H_i}{h}$$

и на этот слой действует сила, направленная в сторону напряженности H_e , т. е. вертикально вверх. Слой будет находиться в равновесии, если давление в воздухе p_e выше давления в жидкости p_i на величину $\mu_0 \frac{M_n^2}{2}$, где

M_n — составляющая вектора намагниченности, направленная по нормали к поверхности. Естественно, что показания прибора вблизи «гребня» будут меньше, чем в боковых точках, где нормальный компонент поля уменьшается.

Подведем итог: однородное нормальное поле вызывает неустойчивость свободной поверхности магнитной жидкости, начиная с некоторых критических значений напряженности.

Мы рассказали о типичной задаче на устойчивость равновесного состояния, когда неравенство стабилизирующих и дестабилизирующих сил приводит к потере устойчивости.

Другой пример влияния магнитного поля на свободную поверхность магнитной жидкости связан с новым направлением в технологии материалов и полупроводников: использование космического про-

странства как идеальной лаборатории для получения материалов повышенной чистоты и однородности, потребность в которых весьма высока. Напомним о серии экспериментов на станциях «Салют» по выращиванию монокристаллов полупроводниковых материалов из их расплавов, проведенных в связи с этими проблемами. Поэтому и возник научный интерес к равновесным формам объемов жидкости в условиях невесомости и влиянию на них инерционных сил. Преимущество космической лаборатории по сравнению с земной состоит прежде всего в резком уменьшении (на несколько порядков) силы тяжести, которая в обычных условиях вызывает макроскопическое перемещение объемов жидкости (концентрационная и гравитационная конвекция) и нарушение условий оптимального технологического режима (появление неоднородности структуры).

Концентрационная конвекция происходит из-за неоднородности концентрации вещества по объему, которая обуславливает различный «вес» отдельных малых объемов жидкости. Другой причиной неоднородности плотности является неодинаковое значение температуры в разных точках объема. Как известно, самый надежный способ избавиться от вредных конвективных течений — это поместить жидкость в космический аппарат, находящийся в условиях, близких к невесомости. Нам уже известно, что в отсутствие силы тяжести (например, для падающей с ускорением $a = g$ капли дождя) поверхностное натяжение формирует идеально сферическую каплю. Можно ли изменить равновесную форму невесомой капли? Ответить на этот вопрос помогает магнитная жидкость, сделать которую невесомой можно на Земле. Для этого достаточно поместить каплю в жидкость (например, с помощью медицинского шприца) с точно такой же плотностью. Тогда сила тяжести, действующая на каплю, будет уравни-

вешена силой, выталкивающей погруженную в жидкость каплю по закону Архимеда. Впервые такой остроумный способ наблюдения сферической формы невесомой капли продемонстрировал бельгийский физик Жозеф Антуан Фердинанд Плато, который еще в 1843 г.

1



поместил каплю масла в смесь воды и спирта той же плотности.

2



3



4



На рис. 21,1 приведена фотография капли магнитной жидкости с начальным диаметром $d_0 = 3,67$ мм, введенной в смесь глицерина с водой, плотность которой подбиралась равной плотности магнитной жидкости. Если сосуд с каплей поместить в однородное горизонтальное магнитное поле, то с увеличением его напряженности будем наблюдать изображенную на рис. 21,2—4 последовательность равновесных форм капли.

Рис. 21. Невесомая капля магнитной жидкости в горизонтальном однородном магнитном поле:

1 — $H = 0$; 2 — $H = 26,7$ кА/м; 3 — $H = 55,7$ кА/м, 4 — $H = 142,4$ кА/м.

Навешенные при описании «магнитных ежей», будут вытягивать каплю магнитной жидкости вдоль линий магнитного поля. Предположим, что приложенное поле обладает общей неоднородностью в каком-то направлении. Тогда на всю каплю в целом будет действовать объемная сила (пропорциональная объему тела), направленная в сторону увеличивающегося поля, которая

Нетрудно догадаться, что искажение внешнего поля каплей и скачок давления на границе раздела, упоминавшиеся

приведет к смещению центра масс капли. Эта сила может быть использована для моделирования незначительных перегрузок (ускорений), действующих на космический аппарат при вращении в связи с поддержанием его ориентации, из-за неоднородности внешнего гравитационного поля (Земли) и вследствие самогравитации, т. е. гравитационного взаимодействия с массой космического аппарата.

Еще одна задача об устойчивости свободной поверхности магнитной жидкости также связана с действием магнитной силы и поверхностного натяжения. Только теперь магнитная сила формирует поверхность, а поверхностное натяжение приводит к ее неустойчивости. Речь идет об устойчивости цилиндрической поверхности жидкости, которая была рассмотрена английским физиком Джоном Рэлеем еще в 1878 г. на примере течения цилиндрической струи обычной жидкости. Здесь действие сил поверхностного натяжения приводит к распаду струи на капли, размер которых определяется ростом «наиболее опасных» возмущений поверхности (напомним, что так называют возмущения, которые развиваются быстрее любых других возмущений). По классической теории, длина волны таких возмущений (расстояние между центрами двух соседних капель) равна $1,43$ периметра струи.

Разместим вокруг цилиндрического проводника с током магнитную жидкость, причем всю систему, так же как и в случае с каплей, погрузим в водный раствор глицерина, плотность которого близка к плотности магнитной жидкости. При прохождении через проводник тока I вокруг него создается круговое магнитное поле, напряженность которого уменьшается по закону $H = 1/(2\pi r)$ с увеличением $r \geq r_1$, где r_1 — радиус проводника. Мы уже знаем, что в неоднородном магнитном поле на единичный объем магнитной жидкости

действует сила $\mathbf{F}_m = \mu_0 M \nabla H$. Чтобы найти бесконечно малое изменение напряженности магнитного поля на свободной поверхности жидкости в радиальном направлении, возьмем производную от H на поверхности жидкости:

$$|\nabla H| = I / (2\pi r^2).$$

Таким образом, сила, с которой цилиндрический слой притягивается к проводнику, зависит от тока I . Взвесив цилиндрический столб магнитной жидкости в жидкости такой же плотности, мы исключим действие гравитационных сил на свободную поверхность слоя. Поэтому будем сравнивать давление, вызванное объемной магнитной силой $\mu_0 M \nabla H$, и давление, создаваемое на поверхности раздела силами поверхностного натяжения, которые стремятся раздробить слой на капли.

Оставим на время слой магнитной жидкости вокруг проводника с электрическим током, магнитное поле которого «прижимает» жидкость к проводнику, и сделаем небольшой экскурс в *теорию подобия* физических явлений. Теория подобия основывается на том общем и не требующем специального доказательства представлении, что законы природы, являясь отображением объективной реальности, не должны зависеть от выбранных масштабов, т. е. системы единиц, применяемых нами при описании физических закономерностей. При изучении физических явлений обычно начинают со схематизации, с выделения основных факторов, определяющих интересующие нас величины, т. е. строится физико-математическая модель исследуемых процессов в виде *функциональных уравнений*. Выбор масштабов должен отражаться только на значении численных коэффициентов уравнений, но отнюдь не на структуре этих уравнений. Поэтому уравнения процесса, представленные в безразмерном виде,— одни и те же для

различных масштабов. Понятие о подобии физических процессов дает возможность обобщить результаты отдельных опытов на все явления, подобные исследованному. Кроме того, методы теории подобия играют большую роль при моделировании различных процессов на моделях, выполненных в удобном для экспериментирования масштабе. Зачастую анализ безразмерных характеристик сложных процессов является начальной стадией их изучения.

Как же получают безразмерные характеристики? Во-первых, вводят отношение текущего значения данного параметра к его значению в некоторой *характерной точке* системы в определенный момент. Во-вторых, путем комбинирования объединяют в безразмерный комплекс несколько параметров, существенных для данного процесса. Безразмерные комплексы, содержащие независимую переменную, называются *определяющими числами подобия*, а содержащие зависимую (искомую) величину, — *определяемыми*. Адекватное (соответствующее физической природе) выделение определяющих факторов требует от исследователя большого опыта, интуиции и умения надлежащим образом схематизировать изучаемое явление. Чтобы представление о теории подобия было полным, сформулируем основное правило этой теории: каждое из определяемых чисел подобия является функцией совокупности определяющих чисел.

Анализируя полученные безразмерные комплексы, можно провести предварительное качественное выяснение механизма изучаемых процессов.

Возвращаясь к невесомому столбу магнитной жидкости, приведем в качестве примера полученный исследователями безразмерный комплекс

$$\text{Bo}_m = \frac{\mu_0 M Gr_2^2}{\alpha} = \frac{\mu_0 M Gr_2}{\alpha/r_2},$$

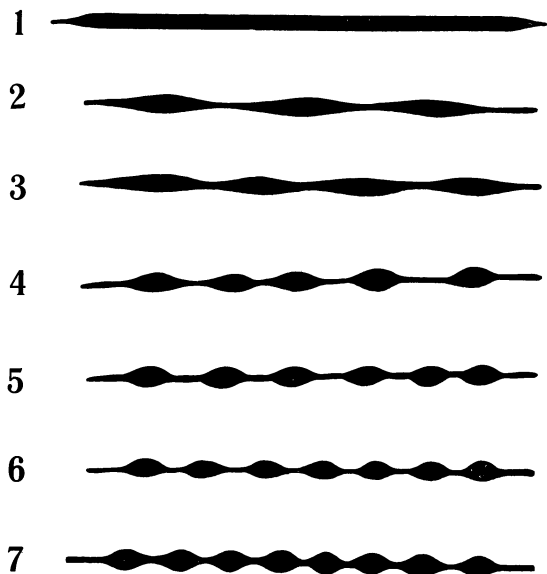
где r_2 — радиус жидкого столба; G — величина характерного градиента напряженности магнитного поля:

$G = \frac{1}{2\pi r_2^2}$. Слово «характерный» означает, что нами

взята какая-то определенная величина градиента, которая характеризует порядок возможных величин градиентов напряженности поля в рассматриваемой задаче и, как легко заметить, определяет силу, действующую на интересующую нас свободную поверхность. Следовательно, Bo_m , названный *магнитным числом Бонда* (фамилия «агента 007» здесь ни при чем!), как раз и представляет собой отношение давления, вызванного на свободной поверхности магнитной силой, к давлению, создаваемому силами поверхностного натяжения. Прототипом этого числа подобия послужило известное число Бонда $Bo = \rho g l^2 / \alpha$, которое характеризует соотношение между поверхностными и гравитационными силами на свободной поверхности жидкости. Здесь l — характерный линейный размер системы.

На рис. 22 представлены фотографии, иллюстрирующие некоторые равновесные формы.

Эксперименты показали, что, действительно, при $Bo_m > 1$ (когда магнитная сила на единицу площади поверхности превышает поверхностную) цилиндрический столб устойчиво прилегает к поверхности проводника (линия 1 на рис. 22). Если $Bo_m < 1$, то слой распадается на капли, число которых определяется значением Bo_m . Наибольшее число капель наблюдалось, когда ток был выключен ($Bo_m = 0$) и поверхностные силы дробили слой на капли, размер которых (и, следовательно, их число на конечной длине столба) хорошо согласовывался с классической теорией распада струи обычной жидкости (линия 7 на рис. 22). С увеличением числа Bo_m количество капель уменьшалось и расстояние между ними увеличивалось, что свидетельствовало о

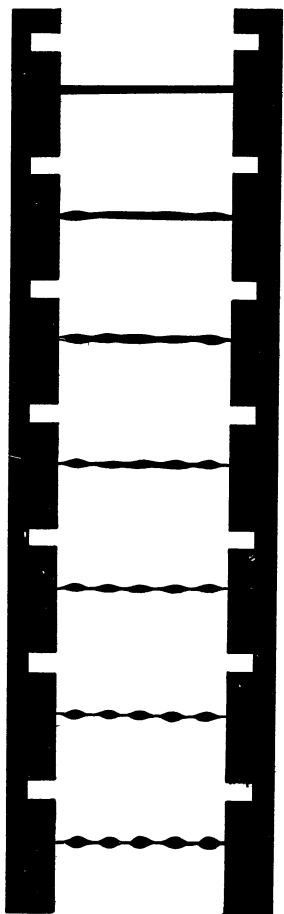


Р и с. 22. Цилиндрический слой магнитной жидкости в поле проводника с током:

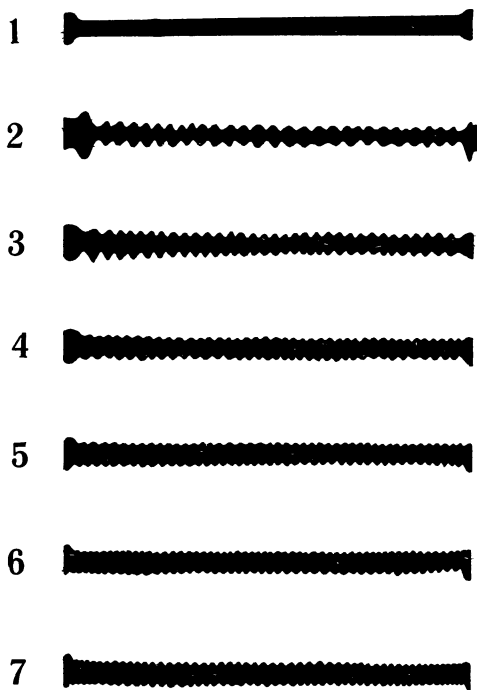
1 — $Bo_m = 1$, 2 — $Bo_m = 0,81—0,89$, 3 — $Bo_m = 0,74—0,78$; 4 — $Bo_m = 0,53—0,65$; 5 — $Bo_m = 0,27—0,45$; 6 — $Bo_m = 0,12—0,24$, 7 — $Bo_m = 0$.

росте длины волны наиболее опасных возмущений поверхности. Процесс распада цилиндрического слоя во времени заснят на киноплёнку, которая приведена на рис. 23. Из кинограммы, время между соседними кадрами которой составляет 1,4 с, видно, что развитие неустойчивости начинается вблизи ограничивающих длину вертикальных стенок и распространяется на всю длину слоя приблизительно за 8,5 с.

Каков же вывод? Неоднородное поле, которое растёт в направлении от свободной поверхности жидкости, увеличивает устойчивость свободной поверхности.



Р и с. 23. Кинограмма распада цилиндрического слоя магнитной жидкости.



Р и с. 24. Действие однородного магнитного поля, перпендикулярного к оси цилиндрического слоя магнитной жидкости:

1 — $H = 0$; 2 — $H = 10,2$ кА/м; 3 — $H = 16,1$ кА/м; 4 — $H = 21,1$ кА/м; 5 — $H = 41,1$ кА/м; 6 — $H = 64,2$ кА/м; 7 — $H = 103$ кА/м

Ранее мы узнали, что нормальное однородное поле дестабилизирует свободную поверхность магнитной жидкости. Посмотрим на устойчивый цилиндрический слой жидкости во внешнем однородном поле, перпендикулярном к его оси. На рис. 24 приведены фотографии равновесных форм столба при $Bo_m > 1$ и различных напряженностях внешнего поля. Рисунок иллюстрирует взаимодействие стабилизирующего (относительно поверхностных сил) неоднородного магнитного поля, создаваемого проводником с током, с нормальным полем, дестабилизирующим цилиндрическую поверхность по верхней и нижней образующим. Для описания влияния внешнего однородного поля на устойчивость искривленной поверхности был предложен критерий $S = \mu_0 M^2 r / \alpha$, образованный из определяющих параметров. Видно, что S характеризует отношение перепада давления на поверхность раздела магнитная жидкость — немагнитная среда, обусловленного скачком нормального компонента намагниченности M_n , к давлению, создаваемому силами поверхностного натяжения. Оказалось, что до определенного значения напряженности внешнего поля H и соответствующего значения M цилиндрический слой вытягивается вдоль силовых линий поля наподобие взвешенной капли, причем в поперечном сечении он приобретает форму эллипса. При достижении критического значения S^* на поверхности возникают «иглы», как и при неустойчивости плоской поверхности. Из рис. 24 видно, что с увеличением H число «иголок» растет, что соответствует уменьшению длины волны возмущения поверхности.

Естественно, что с возрастанием Bo_m , т. е. увеличением магнитной силы, прижимающей жидкость к проводнику, напряженность внешнего магнитного поля, при которой возникает поверхностная неустойчивость, тоже растет.

Опыты с цилиндрическим слоем показали еще одну особенность воздействия поля на свободную поверхность магнитной жидкости. Если проводник поместить во внешнее поле, направление которого совпадает с осью проводника, то силовые линии поля будут направлены по касательной к свободной поверхности (такое поле называют *тангенциальным*). Оказалось, что при некоторой величине тангенциального поля слой сохранял свою цилиндрическую форму даже после выключения тока (что соответствует случаю $B_{0m} = 0$), т. е. поверхностные силы не могли преодолеть стабилизирующего влияния внешнего поля и слой не распадался на капли. Когда мы рассказывали об увеличении устойчивости свободной поверхности в неоднородном поле, растущем по мере погружения в жидкость, то это имело простое физическое толкование: жидкость «втягивалась» в область сильного поля и устойчивость ее свободной поверхности увеличивалась. А вот действие тангенциального поля не так очевидно. Механизм увеличения устойчивости свободной поверхности здесь несколько иной. С увеличением внешнего поля число капель, на которые распадается слой после выключения тока, уменьшалось, а затем слой не распадался вообще. Это свидетельствует о том, что с увеличением поля происходит сдвиг длины волны опасных возмущений (приводящих к неустойчивости поверхности) в сторону более длинных волн. Начиная с некоторого критического значения поля, длины волн опасных возмущений превышают длину слоя и он становится абсолютно устойчив.

Представьте себе реальный аппарат со стекающей магнитной жидкостью, скажем, пленочный массообменный аппарат, который предназначен для интенсификации массообмена между газом и жидкостью в некоторых технологических процессах. Поскольку длина

стекающей пленки определяется высотой аппарата, то практически важно увеличить длину опасных возмущений настолько, чтобы они превышали эту высоту. Тогда течение в аппарате будет устойчивым относительно рассмотренных выше возмущений, что и соответствует наиболее благоприятному режиму работы. Существуют и более тонкие ухищрения, позволяющие повысить устойчивость процессов, но суть их одна: не дать развиться опасным возмущениям.

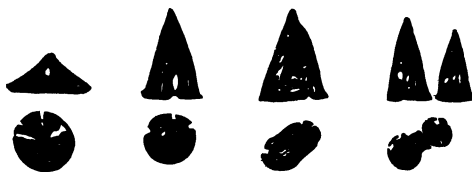
Подведем итоги нашего рассказа о свободной поверхности магнитной жидкости. Неоднородное магнитное поле, растущее внутрь жидкости, и поле, тангенциальное к поверхности раздела, увеличивают устойчивость свободной поверхности. Два других поля — однородное нормальное к поверхности раздела и неоднородное, увеличивающееся по направлению из жидкости, — уменьшают устойчивость поверхности. Действие последней конфигурации поля не требует специальных пояснений, так как ясно, что жидкость будет «стремиться» к сильному полю и снижать устойчивость своей свободной поверхности.

В РЕПЕРТУАР ИЛЛЮЗИОНИСТА

Все вы, конечно, посещали представления иллюзионистов и с удивлением следили за чудесами на манеже. Вот что пишет Ю. Никулин в своей книге «Почти серьезно...» об аттракционе Э. Кио: «Глаза его иронически поблескивали сквозь очки. Всем своим видом он как бы говорил: «В общем-то, все, что вы увидите, конечно, обман, но попробуйте догадаться, в чем он. Я хочу вас поразить. Да, мне это ничего не стоит сделать».

Трюки знаменитого иллюзиониста были построены на системе отвлечений, ловкости рук и аппаратуре.

Мы тоже хотели бы вас поразить, не прибегая, правда, к ловкости рук, а используя лишь аппаратуру: ведь нам нужно создать магнитное поле. Итак, зал погружается в темноту. Играет оркестр. Цветные прожекторы высвечивают электромагнит, создающий вертикальное однородное поле. Между полюсами магнита на горизонтальной твердой поверхности лежит... капля магнитной жидкости. С ростом напряженности поля капля вытягивается вдоль силовых линий поля и принимает форму конусообразного пика, симметричного относительно вертикальной оси. Высота пика постепенно увеличивается, а его поперечный радиус уменьшается. Внимание! Барабанная дробь! Капля неожиданно начинает раздвигаться, распадаясь на две примерно



Р и с. 25. Распад капли магнитной жидкости в вертикальном однородном магнитном поле.

одинаковые части, расположенные на некотором расстоянии друг от друга. Серия фотографий, представленных на рис. 25, иллюстрирует этот процесс. На каждой фотографии изображены две проекции капли, нижняя из которых — вид сверху. На первой фотографии показана капля в магнитном поле с напряженностью $H = 8 \cdot 10^3$ А/м, которое не вызывает стремления отдельных ее частей стать самостоятельным конусом. На следующих photographs представлена картина при напряженности поля, равной $8,5 \cdot 10^3$ А/м, показывающая состояние капли с интервалом времени 10 с. Сначала в основании капли образуется углубление, которое

постепенно распространяется по всей высоте капли. На последней фотографии мы видим конечный результат «магического» действия поля — образование двух отдельных устойчивых во времени конусов меньшего размера, которые отодвинулись друг от друга. Черный шлейф, соединяющий конусы на виде сверху, — всего лишь след, оставляемый на твердой подложке раздвигающимися частями.

На чем основан описанный «фокус»? Прежде всего, конечно, на соотношении потенциальных энергий двух состояний магнитной жидкости. Минимум потенциальной энергии объема (в опыте он составлял $0,35 \text{ см}^3$) магнитной жидкости, подвергнутого действию магнитного поля, достигался, когда этот объем находился в раздробленном состоянии.

Проанализируем силы, действующие на каплю в вертикальном поле критической величины. Поле вытягивает каплю вдоль вертикальной оси, уменьшая площадь ее основания. Мы уже упоминали о явлениях на границе жидкости с твердым телом. Если капля жидкости лежит на твердой поверхности, то форма ее зависит от того, смачивает или не смачивает жидкость материал поверхности. Угол, образованный касательной к поверхности жидкости (со стороны жидкости) в той точке, где жидкость граничит с твердым телом, называют *краевым углом*. Когда угол острый, то говорят, что жидкость смачивает тело, когда он тупой, — не смачивает. Оказалось, что для смачивающих твердую поверхность магнитных жидкостей время распада капли значительно превышало время распада для несмачивающих жидкостей. По-видимому, сила поверхностного натяжения, действующая по периметру капли и равная произведению коэффициента поверхностного натяжения на периметр основания капли ($f = \alpha \cdot 2\pi R$), выше для смачивающей жидкости. Поэтому и время распада

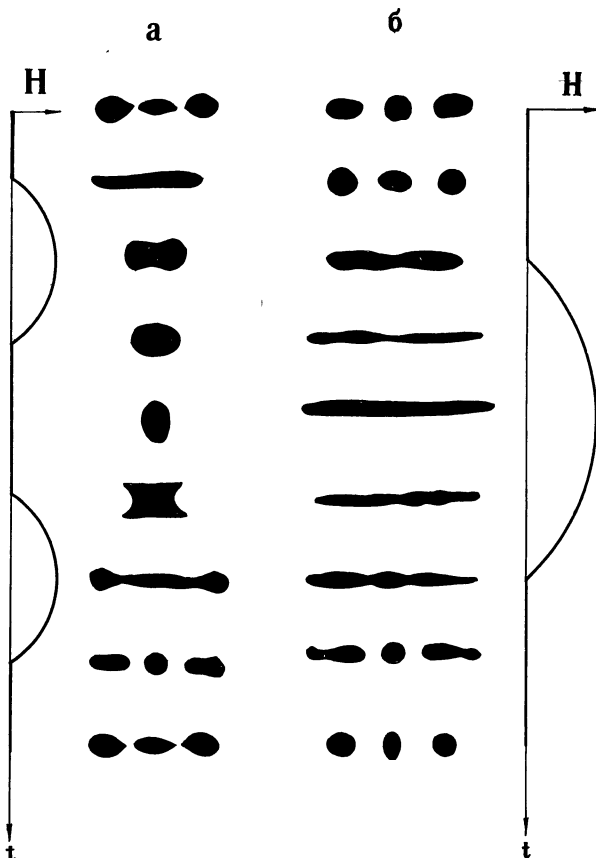
капли такой жидкости при достижении критического поля больше. И последний совет иллюзионисту: нельзя брать слишком мелкие капли — поле как бы не «замечает» их. Например, для капель жидкости в описанном «фокусе», по объему меньших $0,25 \text{ см}^3$, дробление вообще не наблюдалось. Поэтому не жалейте жидкости на премьере!

А теперь займемся «фокусами» с нестационарным магнитным полем. Рассмотрим такую разновидность переменного во времени поля, которое можно описать синусоидальным законом, считая, что направление поля не меняется, напряженность его одинакова в некотором объеме и периодически изменяется во времени. Постараемся, чтобы эти колебания поля происходили отдельными всплесками, расстояние между которыми и составляет длину волны изменения напряженности. Поместим в этот объем каплю магнитной жидкости и уравновесим силу тяжести уже известным способом (см. рис. 21, 1).

Нам уже известно, что в однородном поле капля вытягивается вдоль силовых линий, а при его выключении поверхностные силы вынуждают ее снова принять форму сферы. На каплю опять действуют магнитная и поверхностная силы, только теперь они периодически чередуются во времени.

Чтобы описанный далее процесс распада капли был понятнее, напомним, что совпадение частоты вынуждающей силы и собственной частоты системы приводит к резкому увеличению амплитуды изменяющейся характеристики системы. Это явление называется *резонансом*. Оно применимо и к нашей капле. Когда вытянутая капля возвращается к сферической форме, по ее свободной поверхности распространяются возмущения в виде поверхностных волн. Частоты этих возмущений отличаются друг от друга на конечную величину (физики говорят в таких случаях про дискретный спектр частот).

Это и есть *собственные частоты* «взвешенной», т. е. свободно плавающей, капли магнитной жидкости. Вынуждающей силой служит магнитное поле, которое



Р и с. 26. Кинограмма резонансного распада капли магнитной жидкости в переменном магнитном поле.

с определенной частотой деформирует ее поверхность. Все условия для возникновения резонанса есть. И он наступает, когда частота колебаний внешней вынуждающей силы — магнитного поля — совпадает с одной из собственных частот колебаний поверхности. При этом амплитуда колебаний возрастает настолько, что капля распадается на части, число которых увеличивается с ростом частоты поля. Этот процесс называют *резонансным распадом капли*.

На рис. 26 приведена кинограмма, на которой запечатлены два режима резонансного распада в переменном магнитном поле. По вертикали рядом с каждым режимом нарисованы соответствующие зависимости напряженности поля от времени. На самом верхнем кадре мы видим в обоих случаях три капли, на которые распадается первичная капля после начального всплеска поля (вытягивание капли в эллипсоид) и последующего снижения напряженности до нуля. Это дробление происходит под действием поверхностных сил, как и в тонкой струйке обычной воды, вытекающей из крана. Из кинограммы хорошо видно, что один режим распада происходит за два периода ($2T$) изменения внешней силы (рис. 26, а), а второй — за один период (рис. 26, б). В первом режиме три вторичные капли с ростом напряженности сливаются в одну, вытянутую вдоль поля. Затем при уменьшении поля до нуля капля сжимается и в момент времени $t = T$ принимает форму, близкую к сферической. В нулевом поле по инерции капля продолжает сжиматься, и к началу следующего всплеска напряженности она имеет вид эллипсоида, у которого длинная ось уже перпендикулярна к полю. Своеобразная форма образуется на участке второго увеличения поля до максимальной величины (шестой кадр сверху): сжимающаяся капля начинает «чувствовать» магнитное поле, стремящееся растянуть ее.

Как только поле достигает максимальной напряженности, что соответствует времени $t = \frac{3}{2} T$, капля вытягивается вдоль поля до максимальной длины, и в конце второго периода вновь происходит дробление капли на три части.

Во втором режиме три вторичные капли сливаются в одну, вытянутую вдоль поля, за время $T/4$. При последующем уменьшении напряженности поля от максимального значения до нуля капля распадается на три части, которые к концу первого периода изменения поля имеют вид трех вторичных капель.

На вопрос, в чем причина существования двух предельных режимов дробления капли, пока ответа нет. В описанном эксперименте амплитуда колебаний напряженности магнитного поля изменялась от 0 до $80 \cdot 10^3$ А/м. При небольших амплитудах наблюдался первый режим, в области максимальных амплитуд — второй. Когда задавалась промежуточная амплитуда напряженности, то дробление капли состояло из комбинации этих предельных режимов. Так что амплитуда поля может оказаться важнейшим инструментом в руках иллюзионистов для пропаганды среди зрителей пока не разгаданных явлений природы.

УЧТЕМ НЕВИДИМОЕ

Мы уже обсуждали понятие модели на примере расчета энергии молекулы водорода и выяснили, что структура модели выбирается, исходя из тех деталей физической системы, которые считаются основными в данном приближении. Предлагаемая модель должна удовлетворять общим физическим принципам, и в то же время в ней опускаются те или иные факторы, без которых возможен наглядный качественный и достаточно

точный количественный анализ конкретного процесса. Другими словами, физико-математическая модель должна быть достаточно простой, чтобы с ее помощью получить соотношения, связывающие неизвестные (зависимые) и независимые переменные.

В качестве примера того, как может протекать процесс схематизации при описании исследуемого объекта, рассмотрим историческую последовательность физико-математических моделей магнитной жидкости. Но сначала поговорим о металлах, остающихся жидкими при комнатной температуре. Один из них вы хорошо знаете — это ртуть, которой наполняют медицинские термометры. Второй менее известен: сплав трех металлов — галлия, индия и олова. Он, как и ртуть, хорошо проводит электрический ток и представляет собой при комнатной температуре жидкость серебристого цвета.

Оба металла — примеры жидких проводников. Джозеф Нойрингер и Рональд Розенцвейг в 1964 г. предложили считать магнитную жидкость жидким магнетиком, предполагая ее однофазной, однородной и изотропной средой, намагниченность которой «размазана» по всему объему. Такая модель учитывала главное свойство магнитной жидкости — ее намагниченность. Предполагалось, что время выстраивания суммарного магнитного момента вдоль поля несоизмеримо мало по сравнению с любым характерным временем в системе. Следовательно, векторы намагниченности **M** и магнитного поля **H** в любой момент времени будут параллельны друг другу. Таким образом, наша жидкость отличается от обычной воды только тем, что каждый ее малый объем обладает магнитным моментом. Напомним еще раз, что аналогичная ситуация наблюдается в парамагнитном газе, только там носителями магнетизма являются отдельные молекулы. Это значит, что для описания движения магнитной жидкости мы должны

задать в каждой точке и в любой момент времени свойства, характерные для обычной жидкости, и дополнить их другими переменными, отражающими взаимодействие магнитной жидкости и внешнего поля.

Как известно, состояние движения жидкости определяется распределением в ней плотности, давления и температуры. Эти величины не характеризуются направлением в пространстве и называются *скалярами*. Но есть и векторная величина — скорость движения жидкости, которую мы можем разложить в каждой точке на три компонента. Для магнитной жидкости нам следует еще найти распределение намагниченности $\mathbf{M}(x, y, z, t)$ и напряженности магнитного поля $\mathbf{H}(x, y, z, t)$. Конечно, задачу можно усложнить и учитывать, помимо этого, распределение плотности электрического заряда в жидкости, тока проводимости и напряженности электрического поля (две последние величины — векторы). Но, припомнив наши рассуждения о простоте модели, будем считать эффекты, связанные с указанными тремя характеристиками, несущественными. Тем более, что свойства реальных магнитных жидкостей дают нам для этого полное основание.

Таким образом, предложенная модель магнитной жидкости отличается от гидродинамической модели обычной несжимаемой жидкости (плотность которой при неизменной температуре постоянна) только дополнительной силой, действующей на жидкость в неоднородном магнитном поле.

Математическое выражение для механической силы, действующей в неоднородном поле на частицу, которая обладает магнитным моментом \mathbf{m} , было получено, когда о магнитных жидкостях еще никто не имел представления:

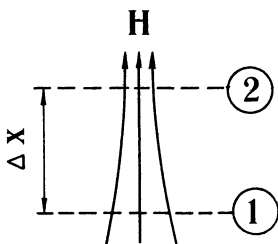
$$\mathbf{f}_m = (\mathbf{m} \nabla) \mathbf{H}.$$

Эту силу иногда называют *пондеромоторной* (от латинских слов *pondus* — все и *motore* — двигатель). Но мы с успехом можем применить это соотношение к магнитной жидкости, просуммировав силы по всем частицам, содержащимся в единице объема:

$$\mathbf{F}_M = (\mathbf{M} \nabla) \mathbf{H}.$$

Физическая сущность приведенной формулы проявляется, если расшифровать математические операции, скрывающиеся под такой записью. Тогда окажется, что на единичный объем магнитной жидкости действует сила, равная изменению вектора напряженности поля \mathbf{H} на единице расстояния вдоль направления вектора магнитного момента \mathbf{M} , умноженному на модуль этого вектора M . Расчет такого изменения \mathbf{H} (который мы не будем здесь делать) по всем направлениям в декартовой (прямоугольной) системе координат приводит к девяти членам в выражении для силы, так что математическое описание магнитной силы достаточно сложно и связано с пространственной неоднородностью векторного поля.

От этих сложностей нас спасает предположение, что $\mathbf{M} \parallel \mathbf{H}$ в любой момент! Не вдаваясь в детали тензорного исчисления, приведем конечный результат: действующую



Р и с. 27. Схема для определения средней неоднородности магнитного поля:

$$|\nabla H| = (H_2 - H_1)/\Delta x.$$

силу теперь вполне определяются три компонента вместо девяти. Это означает, что магнитная сила приобретает более простой вид: $\mathbf{F}_M = M \nabla H$, т. е. численное значение намагниченности жидкости умножается на градиент (перепад в направлении наибольшей быстроты изменения) скалярного поля H . Следо-

вательно, две векторные величины в выражении для силы заменяются на скалярные. Рис. 27 показывает, как находится величина градиента напряженности магнитного поля на практике, а направлен градиент в сторону возрастания H . Так же направлена и сила \mathbf{F}_M . Если же распределение H в пространстве трехмерное, т. е. напряженность изменяется и по координате, перпендикулярной к плоскости листа, то градиент поля совпадает с направлением наибольшей быстроты изменения поля.

Изучая реакцию жидкости на включенное магнитное поле, мы выяснили, что для коллоидных частиц с $K_a V / (kT) \ll 1$ вращение магнитного момента частицы и его выстраивание по полю никак не связано с положением самой частицы. Вот такие «суперпарамагнитные» жидкости, в которых элементарными носителями магнетизма являются взвешенные частицы, и описывает простейшая модель магнитной жидкости. Магнитное поле при этом предполагается неизменным во времени (*стационарным*).

Введенное условие параллельности \mathbf{M} и \mathbf{H} предполагает, что скорость установления равновесной намагниченности намного превышает скорости движения жидкости. Поэтому назовем такое приближение *моделью равновесной намагниченности*.

Теперь остановимся на определении статических магнитных параметров. Влияние магнитной жидкости на распределение поля в ней учитывается с помощью вектора магнитной индукции, который связан с напряженностью поля \mathbf{H} и намагниченностью \mathbf{M} :

$$\mathbf{B} = \mu_0(\mathbf{H} + \mathbf{M})$$

или

$$\mathbf{B} = \mu_0 \mathbf{H}(1 + M/H) = \mu_0 \mathbf{H}(1 + \chi) = \mu \mathbf{B}_0.$$

Обращаем ваше внимание, что здесь используется

зависимость $\chi = M/H$, т. е. мы находимся на линейном участке кривой намагничивания, когда до насыщения еще далеко. Кстати, именно поле магнитной индукции является физическим полем, которое можно количественно характеризовать величиной $|\mathbf{B}|$, измеряемой, например, по силе, действующей на проводник с током в соответствии с законом Ампера. А вот векторы \mathbf{M} и \mathbf{H} в СИ являются расчетными параметрами, которые широко применяются при описании магнитных явлений.

Перейдем теперь к моделям, описывающим течение магнитной жидкости, магнитные частицы которой достаточно велики: $V > kT/K_a$. При таких размерах уже нельзя считать жидкость однофазным магнетиком, а следует приписать ей некоторую внутреннюю микроструктуру, для чего приходится рассматривать поведение отдельных взвешенных частиц. Напомним, что их размеры гораздо меньше микрометра, поэтому анализ взаимодействий на таком уровне мы определим как учет микроструктуры жидкости. Внешнее поле стремится сориентировать магнитный момент \mathbf{m} частицы и внутреннее поле кристаллической анизотропии \mathbf{H}_a вдоль вектора напряженности поля \mathbf{H} . Если $\mathbf{H}_a \gg \mathbf{H}$, то \mathbf{m} совпадает с \mathbf{H}_a (момент «вморожен») и оси легчайшего намагничивания выстраиваются вдоль поля. В то же время вихревой поток жидкости будет увлекать частицу, отклоняя магнитный момент \mathbf{m} от равновесной ориентации. Это, как уже говорилось, может повлиять на намагниченность жидкости и ее вязкость. Обратите внимание, как постепенно усложняется наша модель. Это связано прежде всего с вращением частицы в сдвиговом потоке. Раньше мы следили только за магнитными моментами частиц, теперь же учитываем ориентацию самих частиц магнитным полем. В результате приходится рассматривать процесс установления равновесной намагниченности. Система дополняется теперь

еще одним уравнением, описывающим движение магнитного момента во времени. Кроме того, в отличие от предыдущей модели намагниченность может зависеть и от движения жидкости. Причина, приводящая к этим дополнениям, кроется в действии моментов магнитных сил, которые должны уравниваться моментами силы трения частиц о жидкость, чтобы картина течения не изменялась во времени.

Вспомните, что о моментах сил в модели равновесной намагниченности не говорилось ни слова, там действовали только сами силы. В усложненной модели, где частицы могут вращаться относительно жидкости (из-за действия на них магнитного поля), наряду со скоростью, плотностью, давлением и температурой среды должен рассматриваться как независимая функция *внутренний момент количества движения (импульса)*. Он служит макроскопической характеристикой собственного вращения частиц и состоит из суммы моментов инерции частиц в единичном объеме $I = nI_0$, умноженной на среднюю скорость их упорядоченного вращения ω_s . При гидродинамическом описании магнитной жидкости с учетом внутренних вращений частиц система дополняется *уравнением баланса внутреннего момента импульса*. Уравнение, описывающее поступательное движение элемента среды, будет содержать дополнительный член, описывающий передачу импульса от поля к жидкости посредством внутренних вращений. Все эти усложнения необходимы, чтобы описать процесс обмена моментом импульса между твердой фазой и жидкой основой, которым нельзя пренебрегать при $V > kT/K_a$.

Существуют и более сложные модели, в которых учитывается не только момент импульса частиц, но и спиновый момент электронов, вносящих вклад в намагниченность. В этой модели можно учесть и энергию

магнитной анизотропии, и энергию теплового движения магнитного момента в частице. Что дает это усложнение? В модели появляются дополнительные внутренние степени свободы, связанные с движением момента относительно частицы, что приближает ее к реальной физической системе.

Конечно, последняя модель гораздо сложнее первоначальной, зато она описывает явления, которые «не по плечу» модели равновесной намагниченности, например взаимодействие магнитной жидкости с переменными электромагнитными полями, частоты которых достигают СВЧ диапазона ($f \sim 10^9 - 10^{11}$ Гц).

Описанная последовательность подходов демонстрирует, как можно конструировать модели различного уровня в зависимости от сложности рассматриваемого явления. Адекватная модель должна учитывать только важнейшие механизмы, определяющие поведение объекта, и не быть перегруженной деталями, не имеющими принципиального значения.

Для подтверждения сказанного рассмотрим известное из гидравлики соотношение, которое связывает давление в текущей жидкости p , ее скорость v и уровень h в гравитационном поле, — *уравнение Бернулли*. Оно выражает в простейшей форме следующее правило: в несжимаемой жидкости три формы энергии — энергия давления (или работа, затраченная на создание безвихревого движения жидкости), кинетическая и потенциальная энергии — всегда в сумме составляют постоянную величину вдоль одной линии тока:

$$p + \frac{\rho v^2}{2} + \rho gh = \text{const.}$$

Анализируя различные комбинации этих трех членов, можно количественно охарактеризовать соответствующее состояние жидкости. Например, если вода покоится в каком-нибудь резервуаре ($v = 0$ по всему

объему), то давление возрастает с глубиной: $\Delta p = \rho g \Delta h$. Если же вода вытекает из резервуара через отверстие в его стенке (давление на поверхности жидкости и в струе одинаковое, например атмосферное), то скорость истечения связана с глубиной соотношением

$$v = \sqrt{2g\Delta h}.$$

Наконец, если цилиндрическую трубку с полусферическим носиком погрузить в протекающую по горизонтальной трубе несжимаемую жидкость ($h = \text{const}$), то скорость ее течения можно определить по перепаду полного давления в точке торможения потока на полусфере, где скорость равняется нулю, и статического давления в жидкости:

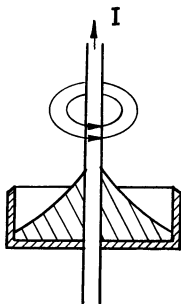
$$v = \sqrt{2\Delta p / \rho}.$$

Это известное уравнение так называемой *трубки Пито*, широко используемой при измерениях скорости течения жидкостей и газов.

Уравнение Бернулли для течения магнитной жидкости в неоднородном магнитном поле должно содержать еще член, описывающий взаимодействие жидкости и поля. При подходе, соответствующем уровню описания, которое дает уравнение Бернулли, нас интересует не внутренняя структура магнитной жидкости, а только тот факт, что единичный объем обладает магнитным моментом во внешнем поле. При изотермическом течении жидкости в магнитном поле, изменяющемся вдоль линии тока от нуля до H , обычное уравнение Бернулли дополняется отрицательным членом ($-\mu_0 \bar{M} H$), пропорциональным средней намагниченности \bar{M} , где M определяется соотношением (здесь намагниченность интегрируется, как бы суммируется, вдоль течения жидкости)

$$\overline{M} = \frac{1}{H} \int_0^H M dH.$$

Как уже отмечалось, этот член описывает дополнительный градиент давления, втягивающий жидкий магнетик в область сильных полей. Комбинация «магнитожидкостного давления» $\mu_0 \overline{M} H$ с остальными членами уравнения дает новые, неизвестные для обычной жидкости эффекты. При $v = 0$ в неоднородном магнитном поле давление будет выше в тех участках жид-



Р и с. 28. Магнитная жидкость в поле проводника с током.

кости, где поле сильнее. Представьте себе вертикальный металлический стержень, пронизывающий сосуд с магнитной жидкостью (рис. 28). Как только по стержню пойдет ток, жидкость «полезет» по стержню вверх до той высоты, на которой гравитационная сила будет уравновешивать магнитную. В этом нет ничего неожиданного: ведь магнитное поле проводника с током убывает обратно пропорционально расстоянию от его поверхности. Значит, сила, действующая на жидкость, будет прижимать ее к стержню.

В неподвижной жидкости наблюдается еще одно интересное явление, о практической пользе которого мы поговорим далее. Так как «магнитожидкостное давление» выше в области сильных полей, то на любое немагнитное тело конечных размеров, погруженное в жидкость, будет действовать сила, направленная в сторону слабых полей. Действительно, тяжелый немагнитный (например, нейлоновый) шарик утонет в жидкости, плотность которой ниже плотности шарика. Но

если ко дну пробирки приложить постоянный магнит, то давление в нижней части пробирки увеличится и под влиянием разности сил, действующих на нижнюю и верхнюю поверхности, шарик сможет всплыть.

Что случится с постоянным магнитом, если бросить его в сосуд с магнитной жидкостью? Ведь его поле тоже неоднородно, и напряженность поля возрастает с приближением к поверхности магнита. Следовательно, давление вблизи магнита в жидкости будет выше. В том случае, если действующая на магнит сила, равная произведению давления на поверхность, превысит силу тяжести, магнит оторвется от дна и будет находиться во взвешенном состоянии под влиянием собственного поля. Но магнит не только всплывет, он к тому же расположится на одинаковых расстояниях от боковых стенок сосуда. Предположим, магнит расположился ближе к одной стенке, чем к другой. Тогда его магнитное поле как бы «сожмется» возле этой стенки из-за ее низкой магнитной проницаемости. Значит, давление в жидкости вблизи стенки возрастет, и магнит вынужден будет «отодвинуться» от нее.

Существует еще одна интересная взаимосвязь между магнитным полем и скоростью, следующая из уравнения Бернулли, обобщенного для магнитной жидкости. Пусть свободная горизонтальная струя такой жидкости пересекает область, в которой создано магнитное поле. Тогда давление и уровень будут одинаковыми вдоль линии тока, и скорость в присутствии поля должна возрасти, чтобы уравновесить отрицательную добавку «магнитожидкостного давления». Так как расход жидкости постоянен в каждом сечении (чтобы струя не разрывалась), то площадь ее сечения будет уменьшаться в области поля. Не правда ли, это неплохой способ вводить электрические сигналы в гидравлическую управляющую систему без использования движущихся частей?

ЮЛА ДЛЯ ВУНДЕРКИНДА

Вундеркинд — это очень умный ребенок. Поэтому его не удивит вращающаяся юлой, которую мы раскрутили механическим путем, преобразовав поступательное движение ручки во вращение корпуса простейшей червячной передачей. Но даже ему может быть неизвестен опыт Ньютона, впервые описанный в «Математических началах натуральной философии» в 1686 г.: «Если на длинной нити подвесить сосуд и, вращая его, закрутить нить, пока она не станет совсем жесткой, затем наполнить сосуд водой и, удержав сперва вместе с водой в покое, пустить, то под действием появившейся силы сосуд начнет вращаться, и это вращение будет поддерживаться достаточно долго раскручиванием нити. Сперва поверхность воды будет оставаться плоской, как было до движения сосуда. Затем силой, постепенно действующей на воду, сосуд заставит и ее участвовать в своем вращении. По мере возрастания вращении вода будет постепенно отступать от середины сосуда и возвышаться по краям его, принимая впалую форму поверхности (я сам это пробовал делать)...

Вначале, когда относительное движение воды в сосуде было наибольшим, оно совершенно не вызывало стремления удалиться от оси — вода не стремилась к окружности и не поднималась у стенок сосуда, поверхность оставалась плоской и ее истинное вращательное движение еще не начиналось. Затем, когда относительное движение уменьшилось, повышение уровня воды у стенок сосуда обнаруживало ее стремление удалиться от оси, и это стремление показало постепенно возрастающее истинное вращательное движение, и когда оно стало наибольшим, вода установилась в покое относительно сосуда».

Хотя Ньютона больше интересовало представление об абсолютном и относительном движении, жидкая

юла в конечном счете вращалась с угловой скоростью сосуда. Если вундеркинд уже научился говорить, то он скажет: «Все понятно. Частички жидкости, прилипающие к стенкам, начинают вращаться вместе с сосудом и постепенно увлекают весь объем во вращательное движение из-за внутреннего трения слоев жидкости, так что можете поместить в жидкость на оси вращения свободно подвешенный цилиндрик, и он со временем начнет вращаться с той же угловой скоростью. К нему ведь тоже прилипает слой жидкости!»

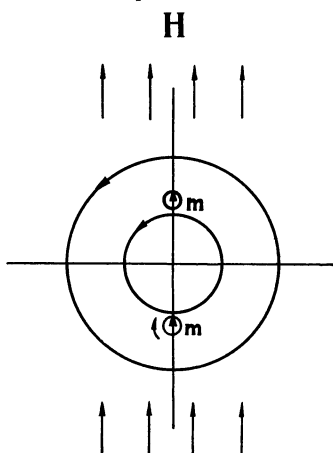
Хотя мы уже знаем, что вундеркинда трудно удивить, давайте скажем ему: «Такая юла из двух соосных цилиндров действительно будет вращаться с угловой скоростью внешнего цилиндра. Но мы можем сделать так, чтобы внутренний цилиндр вращался быстрее вызывающего движения внешнего цилиндра, не изменяя конструкции юлы».

Пока вундеркинд размышляет, объясним, каким образом можно этого добиться. Зальем пространство между цилиндрами магнитной жидкостью и поместим их в однородное магнитное поле, которое имеет составляющую напряженности, направленную поперек оси цилиндров. Надо сразу заметить, что в отличие от только что рассмотренных эффектов, объясняемых уравнением Бернулли, модель равновесной намагниченности не дает нам возможности удивить вундеркинда. В самом деле, если магнитный момент частицы не связан с ней, то ориентация вектора момента \mathbf{m} вдоль напряженности поля не будет мешать частице совершать движение вместе с жидкостью по криволинейной траектории. В результате система в магнитном поле должна вращаться, как твердое тело.

Но проведенные опыты показали, что внутренний цилиндр с увеличением напряженности магнитного поля настигал внешний и перегонял его. Предельное

превышение скорости внутреннего цилиндра в эксперименте составляло примерно 15 %. Следовательно, придется применить более сложную модель магнитной жидкости, чтобы объяснить вундеркинду этот эффект.

Пусть магнитный момент «вморожен» в тело частицы. Тогда частицы, двигаясь по окружности вместе с жидкостью, стремятся сохранить свою ориентацию вдоль направления внешнего поля. Рассмотрим движение



Р и с. 29. Магнитная частица «подталкивает» внутренний цилиндр.

отдельной частицы вблизи поверхности внутреннего цилиндра (рис. 29). Если бы поле было выключено, то частица, перемещаясь вместе с жидкостью и внутренним цилиндром из верхней точки в нижнюю, повернулась бы на 180° . При этом магнитный момент описал бы такую же дугу. Но поле ориентирует момент частицы как в верхнем, так и в нижнем положении вертикально. Подчиняясь действию поля, момент \mathbf{m} в процессе движения частицы будет постепенно поворачиваться (и поворачивать частицу!) по часовой стрелке. Из рис. 29 видно, что, оказавшись в нижнем положении, частица повернется относительно жидкости на 180° . Каждая частица при этом «подталкивает» внутренний цилиндр, вынуждая его вращаться быстрее. Именно это так называемое внутреннее вращение является причиной описанного выше эффекта.

У нас припасен для вундеркинда еще один вариант

юлы той же конструкции. Только теперь мы уже не будем вращать внешний цилиндр с определенной скоростью, как делали ранее. Предположим, что однородное магнитное поле имеет возможность вращаться относительно цилиндров с постоянной угловой скоростью. Правда, осуществить это технически будет нелегко. Один из возможных вариантов состоит в том, что на кольцевую платформу крепятся два постоянных магнита достаточно большой площади, чтобы поле можно было считать однородным. Платформу можно вращать с постоянной скоростью. Система неподвижных соосных цилиндров, из которых внутренний не закреплен, расположена в центральной части платформы и находится в однородном поле. Включим электродвигатель, вращающий платформу. Результат будет тот же самый. Если в первом варианте юлы поместить наблюдателя в систему координат, связанную с внешним цилиндром, то магнитное поле тоже будет вращаться относительно него по часовой стрелке. Следовательно, в новой конструкции в установившемся режиме внутренний цилиндр будет вращаться в противоположную по сравнению с полем сторону.

Как же происходит передача вращения от поля к жидкости, которая и закручивает внутренний цилиндр? Во вращающемся поле магнитные моменты частиц «следят» за полем, и, следовательно, частицы вращаются в том же направлении. Каждая частица, увлекая близлежащие слои, становится центром микроскопического вихря, размеры которого порядка среднего расстояния между частицами в жидкости. Если частицы равномерно распределены в жидкости и вращаются с одинаковой скоростью, то отдельные вихри вращаются навстречу друг другу и взаимно компенсируются, так что в единичном объеме нет результирующего макроскопического движения. Только в случае про-

странственной неоднородности относительного вращения частиц возникает макроскопическое движение жидкости. В рассмотренной конструкции юлы такая неоднородность вносится твердыми границами из-за того, что вблизи них условия вращения частиц неодинаковы. Однако основной вклад дает неоднородность магнитного поля, если таковая существует. Тогда взаимодействие магнитных моментов частиц с полем (вспомните параметр $mH/(kT)$) в разных точках жидкости будет неодинаковым, и скорость их относительного вращения будет различной.

Теперь необходимо ознакомить нашего вундеркинда с понятиями *несимметричной гидромеханики*, которая отличается от классической (симметричной) гидромеханики тем, что в ее моделях учитывается возможность вращения физически малых объемов жидкости, отличающегося от вращательного движения жидкости как целого. Одну такую модель мы уже рассмотрели, когда считали, что объем твердой частицы в магнитной жидкости подчиняется неравенству $V > kT/K_a$. Тогда мы впервые и упомянули о балансе момента импульса. При гидродинамическом описании таких жидкостей необходимо вводить уравнение, выражающее *закон сохранения момента импульса*. Этот закон относится к основным законам природы, имеющим математическую форму законов сохранения. Он утверждает, что полный момент импульса любой замкнутой системы должен всегда оставаться неизменным. Этот закон выполняется независимо от характера взаимодействия элементов системы между собой.

Как и другие законы сохранения, закон сохранения момента импульса достаточно очевиден. Неплохой иллюстрацией этого закона может служить наша планета: и собственный момент Земли, связанный с ее вращением вокруг своей оси, и момент импульса, обуслов-

ленный ее вращением вокруг Солнца,— оба они сохраняются.

При описании магнитной жидкости как несимметричной сплошной среды наряду с законом сохранения полного момента импульса жидкости, складывающегося из внешнего и внутреннего моментов, используются также уравнения баланса этих слагаемых. Основным уравнением несимметричной гидродинамической модели является уравнение баланса внутреннего момента импульса, определяющее поле угловых скоростей внутреннего вращения ω_s . Действующий вращающий момент в этой среде обусловлен непараллельностью векторов намагниченности \mathbf{M} и напряженности магнитного поля \mathbf{H} и записывается в виде $\mu_0 \mathbf{M} \times \mathbf{H}$. Без этого уравнения нам не обойтись, если потребуется математически описать новый тип юлы для особо одаренных детей.

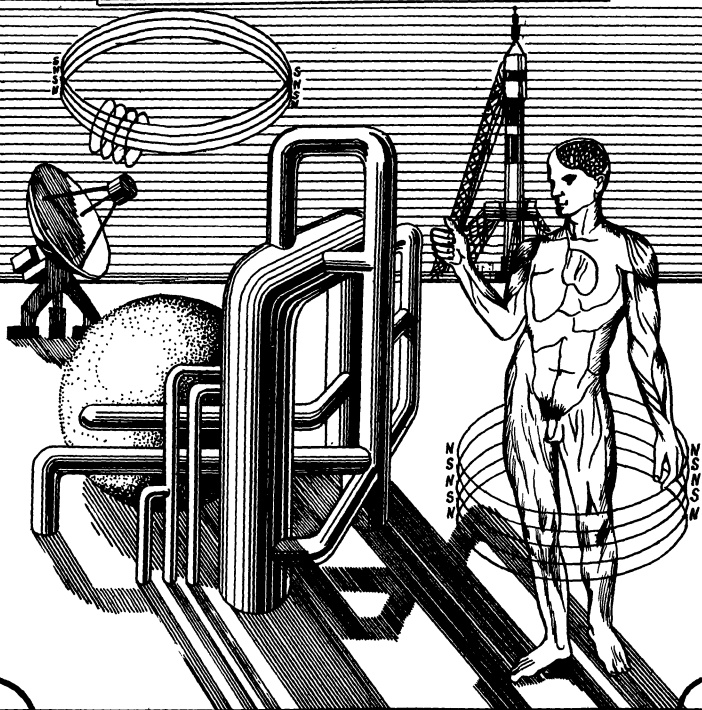
Мы рассказали об основных свойствах магнитных жидкостей, представляющих собой коллоидную систему, и особенностях математического описания их поведения во внешних магнитных полях. Еще раз напомним, что воздействие поля на жидкость связано с присутствием в ней множества мельчайших магнитных частиц, передающих жидкой основе то движение, в которое они вовлекаются внешним магнитным полем. В статической ситуации (когда нет относительного движения жидкости и поля) магнитное поле перераспределяет давление в жидкости, а также может формировать на ее свободной поверхности весьма своеобразный рельеф. Эта особенность взаимодействия поля и жидкости позволяет говорить об уникальных свойствах синтезированной коллоидной системы. Действительно, существуют давно и хорошо известные жидкости, на которые тоже можно воздействовать магнитным полем. Это электропроводящие жидкости,

в которых индуцируется электрический ток при их движении в магнитном поле. Воздействие магнитного поля на токи вызывает появление электромагнитной объемной силы. Но обязательным условием такого взаимодействия является относительное движение жидкости и поля в отличие от магнитной жидкости, которая «реагирует» на присутствие поля и в статике.

Другая особенность магнитной жидкости определяется взаимосвязью электромагнитных и тепловых явлений, протекающих в ней. Пусть температура какого-нибудь участка магнитной жидкости изменилась (например, увеличилась в процессе охлаждения нагретого тела). Тогда в большей или меньшей степени должны измениться все ее физические характеристики, поскольку они зависят от температуры жидкости. К числу этих характеристик относится и намагниченность жидкости. А температурная зависимость намагниченности приведет к изменению интенсивности взаимодействия жидкости и магнитного поля, как можно видеть из формулы для пондеромоторной силы, приведенной на с. 186. В тоже самое время существует так называемый *магнетокалорический эффект*, связанный с явлением повышения температуры магнетика при наложении магнитного поля, которое сопровождается совершаемой работой намагничивания. (Наоборот, при выключении поля магнетик размагничивается и его температура понижается.) Следовательно, множество магнитных частиц изменяет температуру жидкости при воздействии переменного магнитного поля. Ясно, что максимальный эффект будет наблюдаться при температурах, близких к температуре Кюри магнитного материала.

Таким образом, для магнитных жидкостей особенно важна взаимозависимость температурного режима и электродинамического взаимодействия с магнитным полем.

«ЕЖ» ЗА РАБОТОЙ



СВЕДЕНИЯ ДЛЯ ЗОЛОТОИСКАТЕЛЕЙ

В предыдущей главе речь шла о новом магнитном материале, обладающем свойствами жидкого магнетика, способах его получения и некоторых удивительных вещах, происходящих с ним в магнитных полях. Как часто случается, объединение (пусть искусственное) двух независимых качеств (жидкости и магнита) в одном материале открыло новые области его применения, о которых поначалу трудно было догадаться. В период создания магнитных жидкостей специалистам в различных отраслях техники ничего не было известно о новом материале. Поэтому практические приложения ограничивались интересами и эрудицией не очень широкого круга посвященных в дело людей. Как только сведения об успехах в создании жидких магнитных материалов стали публиковать в научной и популярной литературе, предложения об их использовании посыпались со всех сторон. О некоторых из них мы сейчас расскажем. Но может случиться и такое: если вы склонны к придумыванию новых конструкций, улучшающих свойства известных механизмов, то вы своими предложениями можете расширить область применения магнитных жидкостей.

Представьте себе героя рассказов Джека Лондона, посвященных «золотой лихорадке» на Аляске, который, прослышав об очередном открытии мест, богатых драгоценным песком, прежде чем тронуться в путь, торопливо бросает на нарты бидон с жидкостью темного цвета. В вещевом мешке вместе со спичками лежит завернутый в мягкую тряпку керамический магнит. Вы уже догадались, что берет с собой отважный любитель опасностей и желтого металла? Да, это примитивный магнитожидкостный сепаратор (*сепараторами* называют устройства для разделения смеси материалов, плот-

ность которых неодинакова). Не думаем, что рассказы Лондона приобрели бы новое звучание от этой технической новинки, но вот длительный процесс промывки земляных проб золотоискателем сократился бы до одной операции.

Возможность просто разделять немагнитные материалы разной плотности представляет интерес не только для искателей таких редких материалов, как золото или алмазы, но и для людей, связанных с обогащением руды и угля, разделением автомобильного и промышленного лома. Какие атрибуты необходимы, чтобы реализовать эту возможность? Конечно, нужна сама магнитная жидкость и электромагнит со специальным профилем полюсных наконечников, в межполюсном пространстве которого магнитное поле по вертикальной координате имеет постоянный градиент. Тогда, поместив в поле заполненный жидкостью сосуд и изменяя ток питания электромагнита, можно заставить поочередно всплывать материалы разной плотности, которые в отсутствие поля вместе лежали на дне сосуда (их плотность выше плотности жидкости).

Вначале это предложение встретило ряд возражений. Самое главное состояло в том, что магнитной жидкости для таких масштабных мероприятий, как обогащение руды или угля, требовалось много, а ее производство в то время стоило дорого. Затем специалисты разработали и освоили методы синтеза, при которых стоимость конечного продукта практически равнялась сумме стоимостей отдельных компонентов. Магнитные жидкости на водной основе стали тем материалом, с помощью которого удалось сконструировать установки для непрерывного процесса разделения любых известных немагнитных материалов. Подобная сепарационная техника уже применялась ранее, только в качестве взвешивающих сред использовались некото-

рые тяжелые жидкости (например, водный раствор йодистого метилена). В этом отношении магнитные жидкости оказались предпочтительнее, так как они значительно расширяли диапазон плотностей разделяемых материалов и в отличие от большинства применявшихся взвешивающих сред были совсем нетоксичны.

В настоящее время сконструированы системы для непрерывного выделения из автомобильного и электромашинного лома алюминиевых, медных и цинковых деталей. В магнитожидкостном сепараторе, который разработан для обогащения ископаемых руд, пустая порода перемещается в горизонтальном направлении магнитной силой. При совместном действии магнитной и вертикальной гравитационной сил частицы разной плотности движутся по различным траекториям. В этих системах имеется также оборудование для очистки от жидкости сепарированного материала и восстановления использованной магнитной жидкости для дальнейшего процесса.

А как же флотация руд специальными маслами, о которой было сказано столько хороших слов? Опыт такого обогащения тоже пригодился при работе с магнитными жидкостями. Только теперь дополнительно к слою поверхностно-активного вещества, адсорбированного на определенных компонентах смеси немагнитных материалов, наносят тонкий слой магнитной жидкости, имеющей сродство к данному поверхностно-активному веществу. Каждая такая твердая частица оказывается заключенной в магнитную оболочку и легко поддается магнитной сепарации. Понятно, что магнитной жидкости для этого процесса требуется минимальное количество. На таком принципе основано выделение угольной мелочи из зольной породы.

Вернемся снова к страницам, на которых описаны особенности течения магнитной жидкости. Из уравне-

ния Бернулли для магнитной жидкости видно, что в жидкости, заполняющей резервуар высотой h , можно полностью (или частично) компенсировать силу тяжести магнитной силой, если направить их друг другу навстречу. Это означает, что каждый малый объем жидкости «чувствует» себя так, как будто он находится на борту космического аппарата. Следовательно, находясь на Земле, мы сможем имитировать поведение объемов жидкости (например, в топливных баках) в условиях слабых перегрузок, характерных для космического полета. Такая возможность не заинтересует золотоискателей, но может оказаться полезной в современной большой программе освоения космического пространства.

ВРАЩАЙТЕСЬ БЕЗ КАСАНИЙ!

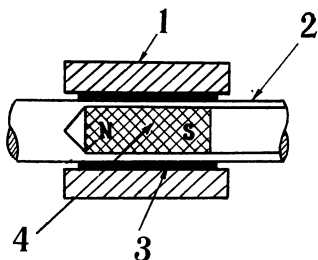
Остановимся ненадолго на процессе трения твердых поверхностей при их относительном движении. Казалось бы, что нового можно сообщить о силе трения, работа по преодолению которой полностью переходит в теплоту. Но мы хотим обратить внимание на колоссальные потери потенциальной мощности в современном механизированном мире на преодоление трения в той или иной форме. Автор книги «Основы и применение трибоники» Десмонд Мур считает, что применение трущихся поверхностей в технических устройствах приводит к расходованию до 1/3 мировых энергетических ресурсов. Слово «трибоника» вам, вероятно, приходилось слышать не часто. Так называют новую научно-техническую дисциплину, изучающую взаимодействие поверхностей деталей машин при их движении относительно друг друга (ее название происходит от греческого слова «трибос», что означает трение). Цель исследований по трибонике — уменьшить до минимума ненужные потери

всюду, где имеются трущиеся поверхности. Области применения трибоники простираются от автомобильной и аэрокосмической промышленности до биомеханики, в частности смазки суставов человека.

Давно известно, что для уменьшения трения между двумя деталями их поверхности скольжения должны быть смазаны: еще египтяне и римляне смазывали жиром ступицы и оси колес повозок. В первых авиационных моторах применяли касторовое масло, а спермацетовое масло широко использовали часовщики. Так как присутствие между двумя движущимися шероховатыми поверхностями жидкой пленки приводит к существенному снижению коэффициента трения, то теория смазки составляет важнейший раздел трибоники.

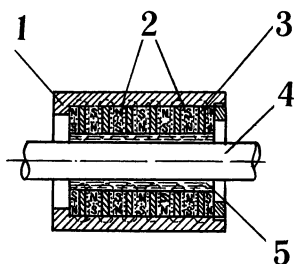
Мы расскажем о применении магнитных жидкостей в радиальных подшипниках, которые, пожалуй, распространены наиболее широко. Они состоят из неподвижной втулки (подшипник), содержащей быстро вращающийся шип (вал). Пространство между ними заполнено смазкой, и на вал действует радиальная нагрузка (например, его вес). В режиме нормальной работы вал расположен эксцентрично по отношению к подшипнику, а течение смазки, увлекаемой валом, в переменном по толщине зазоре создает гидродинамическое давление, достаточное для уравнивания нагрузки. Основное условие нормальной работы гидродинамического подшипника — предотвращение касаний вала и втулки, приводящих к заметному износу твердых поверхностей. А как быть во время пуска и останова машины? Ведь поддерживающая сила появляется, когда вал вращается. Значит, необходимо иметь еще один механизм, создающий поддерживающую вал силу и без его вращения. В магнитной жидкости такой механизм нам хорошо известен — это неоднородное маг-

нитное поле. Пусть магнитная жидкость, приготовленная на основе смазки, находится в магнитном поле, неоднородном по толщине зазора между валом и подшипником. Перемещение неподвижного вала к втулке под действием собственного веса будет приостановлено «магнитожидкостным давлением». Есть еще одно достоинство такого подшипника. При высоких скоростях вращения вала разбрызгиванию смазки под действием центробежных сил препятствуют все те же магнитные силы. Конструкция такого подшипника ненамного сложнее обычного гидродинамического (рис. 30).



Р и с. 30. Простейшая конструкция магнитожидкостного подшипника скольжения:

1 — подшипник; 2 — вал; 3 — магнитная жидкость; 4 — постоянный магнит.



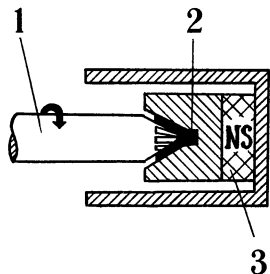
Р и с. 31. Многосекционный магнитожидкостный подшипник:

1 — корпус; 2 — постоянные магниты; 3 — кольцевые прокладки; 4 — вал; 5 — магнитная жидкость.

Известна также конструкция, в которой кольцевой постоянный магнит служит втулкой и образует с валом полость, заполненную магнитной смазкой. Магнит намагничен в осевом направлении и удерживает смазку от вытекания из полости. Если скорость вращения вала невелика, то несущая способность подшипника связана только с неоднородным магнитным полем. Чтобы обеспечить достаточную жесткость подшипника при радиальных смещениях вала, его делают многосекцион-

ным. Для этого постоянный магнит набирают из отдельных кольцевых магнитов, намагниченных в радиальном направлении, причем направление намагниченности соседних магнитов противоположное. В результате магнитные потоки, выходящие из цилиндрических поверхностей в радиальном направлении, искривляются и замыкаются через соседний магнит, так как направление их намагниченностей противоположное. В зависимости от магнитных свойств подшипника и вала кольцевые магниты закрепляют на валу или в корпусе. На рис. 31 приведен продольный разрез многосекционного подшипника с корпусом из магнитного материала и немагнитным валом. Соседние кольцевые магниты разделены немагнитными прокладками. Штриховые линии показывают, как направлены магнитные потоки в подшипнике. Видно, что индукция поля максимальна вблизи внутренних поверхностей магнитов, ограничивающих смазочный слой. Поэтому при смещении вала на него действует возвращающая магнитная сила.

Для текстильной промышленности разработан подобный многосекционный подшипник, в котором жидкость не заполняет весь зазор между валом и магнитами, а сосредоточена в области максимальной напряженности поля, т. е. под немагнитными прокладками. Пространство между магнитожидкостными жгутами заполнено воздухом, который находится также и в зазоре между упорной поверхностью корпуса и торцом вала. Если на вал или на корпус действует осевая нагрузка, то воздух, ограниченный в своих передвиже-



Р и с. 32. Конструкция магнитожидкостного упорного подшипника:

1 — ферромагнитный вал; 2 — магнитная жидкость; 3 — постоянный магнит.

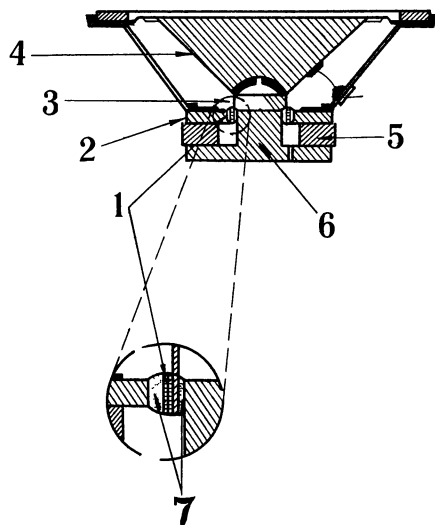
ниях магнитной жидкостью, сжимается и препятствует смещению вала. Такой подшипник называется *упорным*. Другая конструкция упорного подшипника приведена на рис. 32. Здесь осевая нагрузка компенсируется перепадом давления в смазочном слое, возникающем из-за неоднородности магнитного поля.

Магнитную смазку можно использовать для достижения еще одной цели. Дело в том, что любые трущиеся детали раньше или позже изнашиваются, происходит истирание поверхности, состоящее в «отрыве» частиц материала. С помощью неоднородного магнитного поля процесс «отрыва» частицы от поверхности можно затруднить; достигают этого, создавая перепад давления в смазке, который «прижимает» частицу к поверхности.

В СТИЛЕ «ДИСКО»

Акустические колонки являются важной частью системы стереофонического воспроизведения голосов любимых солистов и ансамблей. И хотя стиль «диско» сдал ведущие позиции в программах отдыха и развлечений, требования к громкоговорителям по-прежнему высоки. «Ну, уж к музыке магнитные жидкости иметь отношения не могут», — скажете вы. К музыке, быть может, и не имеют, но вот к акустическим характеристикам мощных громкоговорителей, без которых немислим любой современный вокально-инструментальный ансамбль, имеют отношение самое непосредственное. Каким же образом?

В громкоговорителе магнитной жидкостью заполняют зазор в полюсном наконечнике постоянного магнита, в котором вибрирует катушка акустического элемента (рис. 33). В результате облегчается центрирование катушки, так как она сама устанавливается



Р и с. 33. Схема громкоговорителя с магнитной жидкостью:

1 — катушка; 2 — внешний полюс; 3 — каркас катушки; 4 — конус; 5 — магнит; 6 — центральный полюс; 7 — магнитная жидкость.

симметрично относительно вертикальной оси магнитной системы. Это снижает уровень боковых колебаний, вызванных трением катушки, по сравнению с колебаниями в обычной конструкции, в которой движение катушки происходит в воздушном зазоре. Не требует специальных пояснений факт увеличения магнитной проводимости зазора, заполненного магнитной жидкостью. Но главное, пожалуй, состоит в том, что слой магнитной жидкости демпфирует паразитные резонансные колебания акустического элемента и его колебания после ударного возбуждения. Когда вязкость жидкости подобрана правильно, качество воспроизведения звука становится очень высоким.

Другой параметр, от которого зависят характеристики громкоговорителя,— это намагниченность жидкости. С ее увеличением растет жесткость магнитного демпфера. Есть еще одно немаловажное преимущество громкоговорителей, в которых магнитная жидкость окружает звуковую катушку. При высоких мощностях катушка не перегревается, так как отвод выделяющейся в ней теплоты магнитной жидкостью происходит более интенсивно, чем воздушным слоем. Значит, подводимая мощность может быть увеличена (в несколько раз) при тех же температурных характеристиках изоляции проволоки катушки. Это качество оказалось особенно важным для репродукторов высокого и среднего диапазонов частот.

Каковы перспективы развития магнитожидкостных демпферов для громкоговорителей? Прежде всего они связаны с получением магнитных жидкостей, обладающих низкой испаряемостью при повышенных температурах, что позволит применять их в акустических системах высокой мощности. Такие системы не очень распространены, зато в серийной продукции магнитные жидкости помогут повысить качество выпускаемых громкоговорителей.

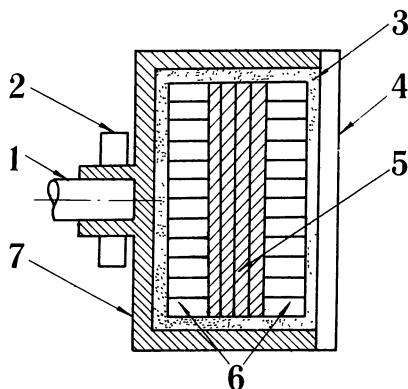
Другие области применения магнитожидкостных демпферов также основаны на свойстве магнитных жидкостей рассеивать кинетическую энергию нежелательных движений и колебаний, переводя ее в тепловую с помощью механизма внутреннего трения. Для одного из американских спутников была разработана система демпфирования угловых колебаний, которая состоит из полого направляющего ребра, заполненного магнитной жидкостью, и постоянного магнита, движущегося вдоль ребра при колебаниях спутника вокруг своей оси. Относительное движение ребра и магнита приводит к уменьшению интенсивности колебаний, энергия которых

рассеивается при трении о стенки канала жидкости, удерживаемой магнитным полем. В противоположность устройствам, основанным на механическом трении, магнитожидкостный демпфер сглаживает процесс торможения от остаточных колебаний.

При конструировании систем с шаговым двигателем обязательно возникает проблема уменьшения времени останова двигателя. Такие системы применяются в точных приборах (например, двухкоординатный самописец), в станках-автоматах и в других автоматизированных устройствах. В чем особенность работы шагового двигателя? В отличие от обычных электрических машин движение его ротора напоминает подъем неисправного лифта: двинулся — остановился. В системах автоматического регулирования время готовности двигателя к следующему циклу сокращают с помощью демпферов. Магнитожидкостный демпфер в отличие от механического не содержит подшипников и внешних движущихся частей, не требует специального обслуживания и не ухудшает характеристик узла вследствие трения. Конструкция его чрезвычайно проста: на конце вала двигателя закреплен немагнитный герметичный корпус, внутри которого в магнитной жидкости взвешена инерционная масса, содержащая постоянный магнит (рис. 34).

Магнитная жидкость применяется в демпфере с двумя целями: 1) инерционная масса взвешивается в жидкости магнитными силами, так что не требуется ни оси, ни подшипников для ее подвешивания; 2) магнитная жидкость может быть приготовлена с заданной намагниченностью и вязкостью, что обеспечивает соответственно нужный уровень взвешивания инерционной массы и плавное демпфирование.

Принцип действия магнитожидкостного инерционного демпфера таков: корпус, будучи частью вала, испы-



Р и с. 34. Магнитожидкостный инерционный демпфер:

1 — вал двигателя, 2 — зажим, 3 — магнитная жидкость; 4 — неферромагнитная крышка; 5 — сталь; 6 — цилиндрические магниты, намагниченные в осевом направлении; 7 — неферромагнитный корпус

тывает те же вибрации и толчки, что и ротор двигателя. Магнитная жидкость, движущаяся вместе с корпусом и увлекающая во вращение инерционную массу, за счет вязкого трения рассеивает энергию колебаний корпуса, переводя ее в теплоту. Демпфирующая способность узла определяется разностью скоростей корпуса и инерционной массы. Другими словами, когда двигатель и, следовательно, корпус, останавливаются, постоянный магнит продолжает вращаться, увлекая жидкость и демпфируя колебания корпуса.

Другое применение магнитной жидкости как демпфирующей среды в шаговых двигателях состоит в ее размещении непосредственно между статором и ротором в виде постоянного магнита без каких-либо изменений в двигателе. Жидкость удерживается в зазоре магнитным полем и снижает время останова ротора в 3—4 раза.

В последнее время много пишут о транспорте на «магнитной подушке». При определенных скоростях движения такое транспортное средство отрывается от земли вследствие взаимодействия сверхпроводящих магнитов на своем борту и направляющего желоба. Демпфирование качки «надземного корабля» предполагается осуществлять таким же способом, как в описанном выше демпфере для спутника, тем более, что магнитное поле в системе уже имеется.

СОВЕТЫ СПРИНТЕРУ

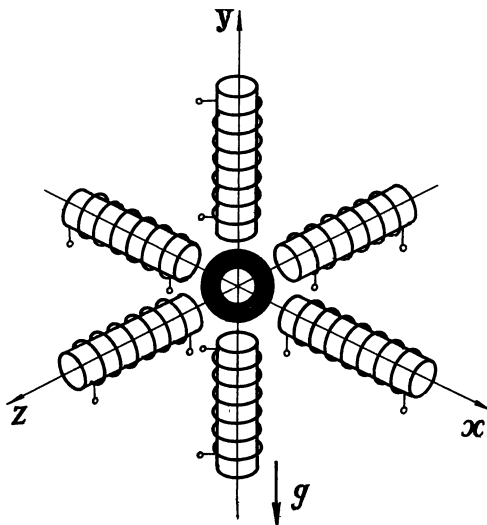
Тело движется с постоянным ускорением, если его скорость равномерно возрастает со временем: $v = at$ или $a = v/t$. Величина a называется *ускорением* и имеет размерность длины, деленной на квадрат времени. Обычно ускорение измеряют в метрах на секунду в квадрате или сантиметрах на секунду в квадрате. Все тела на Земле падают с одним и тем же ускорением, направленным к ее центру и равным $9,8 \text{ м/с}^2$ (его обычно обозначают g). Двигатели, стоящие на автомобилях, самолетах или ракетах, часто характеризуют ускорением, которое с их помощью можно развивать, чтобы знать, за какое время будет достигнута заданная скорость. Такая характеристика называется *приемистостью двигателя*. Качества бегуна на короткие дистанции тоже во многом определяются его способностью набрать максимальную скорость сразу после старта.

Как же измеряют ускорение? Нажимая на акселератор автомобиля, можно, конечно, определить ускорение по спидометру. Для этого необходимо зафиксировать время t , за которое скорость автомобиля увеличилась с v_1 до v_2 . Тогда ускорение можно найти по формуле $a = \frac{v_2 - v_1}{t}$. Однако на других движущихся

объектах, например самолетах, ракетах, морских кораблях, ускорение движения является настолько важной величиной, что на них ставят специальные приборы — акселерометры, измеряющие ускорение в любой момент времени. Принцип действия акселерометров основан на изменении перемещения инерционной массы при изменении скорости тела с v_1 до v_2 . Как только скорость корпуса прибора изменится до v_2 , свободно подвешенная в нем инерционная масса сместится относительно корпуса, так как их мгновенные скорости не будут равны. Это смещение пропорционально разности ($v_2 - v_1$) и, следовательно, действующему ускорению. Поведение стоящего пассажира при резком ускорении автобуса неплохо иллюстрирует этот принцип измерения.

В некоторых конструкциях акселерометров поступательное движение инерционной массы преобразуется во вращательное. Для этого инерционную массу закрепляют в корпусе так, что ее центр не совпадает с геометрической осью прибора. Угол поворота массы вокруг оси будет зависеть от действующего ускорения.

Магнитная жидкость также может применяться для измерения ускорения. Пусть инерционная масса представляет собой немагнитное тело (например, нейлоновый шар). Мы уже знаем, что на немагнитный шар, погруженный в магнитную жидкость, действует сила, направленная в сторону уменьшения напряженности магнитного поля. А что, если создать в жидкости симметричное поле, минимальная напряженность которого расположена в центре симметрии? Тогда шар будет находиться в этой точке в положении устойчивого равновесия, так как любое его смещение приводит к возникновению возвращающей магнитной силы. Такую конфигурацию поля легко создать тремя парами электромагнитов, расположив их по трем координатным осям (рис. 35). Поместив сферический сосуд с магнит-



Р и с. 35. Схема действия трехосевого акселерометра.

ной жидкостью и нейлоновым шаром между полюсами магнитов, получим трехосевой акселерометр для измерения действующих ускорений. В поле тяготения и при отсутствии ускорений ток, питающий нижний электромагнит, должен быть больше, чем в остальных электромагнитах, чтобы компенсировать вес шара. Когда к устройству приложена сила, нейлоновый шар смещается относительно сферического сосуда. Ускорение, связанное с этой силой, можно определить, измерив смещение шара или ток, необходимый для возвращения шара в центральную точку, в каждом из магнитов. Чувствительность прибора такой конструкции оказа-

лась очень высокой: он реагирует на ничтожно малые ускорения, составляющие $10^{-5} g$.

Разработан одноосный акселерометр столь же высокой чувствительности, в котором используется явление взвешивания постоянного магнита в магнитной жидкости. Ранее мы уже описали многосекционный магнитожидкостный подшипник. Если инерционную массу набрать из таких кольцевых магнитов, то по ее смещению в цилиндрическом корпусе, заполненном магнитной жидкостью, можно определить действующее вдоль оси цилиндра ускорение.

ПРИРОДА НЕ ТЕРПИТ ПУСТОТЫ

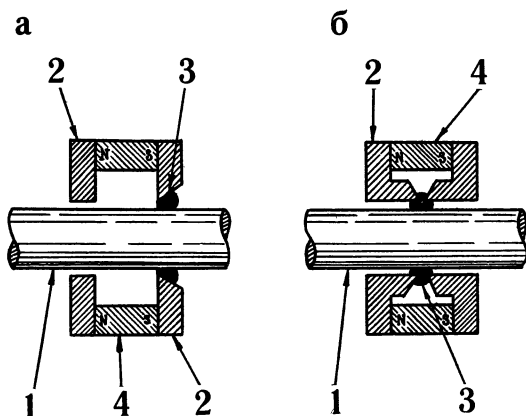
Здесь мы не собираемся описывать физические свойства вакуума, чтобы доказать ошибочность представления о нем как о пустоте, в которой ничего нет и ничего не происходит. Нас будут интересовать более простые вещи, которые связаны с широкой распространенностью вакуумного оборудования в технологических процессах, начиная от вакуумной сушки различных материалов до точной сварки деталей электронным лучом. Можно упомянуть также проблемы, связанные с вакуумом, в производстве полупроводниковых устройств. Например, в процессе осаждения алюминия на кремниевую подложку даже незначительное присутствие воздуха в рабочей камере может привести к превращению электропроводящего алюминия в отличный диэлектрик — оксид алюминия.

Нередко возникает ситуация, когда внутри аппарата следует поддерживать вакуум — достаточно глубокое разрежение. В то же время приходится управлять процессами в вакуумной камере, используя устройства, которые расположены вне ее. Сделать это можно с помощью герметичного вакуумного ввода.

Оказалось, что герметизация вакуума — отнюдь не просто дело. Широко распространенные эластомерные герметизаторы манжетного типа не смогли справиться с этой задачей. Они слишком быстро «уставали» (существует такой термин — усталостные процессы). Под действием постоянной нагрузки такие герметизаторы теряли эластичность, деформировались и воздух проникал сквозь преграду, которая должна была удерживать перепад давления порядка 10^5 Па.

Теперь уже нет сомнений, что без помощи герметизаторов, в которых преградой служит магнитная жидкость, большинство вакуумных проблем решить невозможно. Две простейшие первоначальные конструкции такого узла изображены на рис. 36. Одна из них предназначалась для ферромагнитного вала (а), другая — для неферромагнитного (б).

Конструкция, изображенная на рис. 36, а, получила дальнейшее развитие, и сейчас эксплуатируется уже



Р и с. 36. Принципиальная схема магнитожидкостного герметизатора.

третье поколение герметизаторов такого типа. Кольцевой постоянный магнит 4, охватывающий герметизируемый вал 1, намагничен в осевом направлении. С помощью полюсных наконечников 2, примыкающих к полюсам магнита, в узком кольцевом зазоре между валом и зубцами наконечника создается существенно неоднородное магнитное поле, которое замыкается через магнитопроницаемый вал. Кольцевой слой магнитной жидкости 3 располагается под зубцом полюсного наконечника в области сильных полей и удерживается магнитной силой при вращении вала. В таком герметизаторе, конечно, не может быть никаких остаточных деформаций. Более того, магнитожидкостные герметизаторы обладают редким свойством «самозалечивания». Если рабочий перепад давления по каким-либо причинам резко возрастет (например, из-за динамических ударов вне герметизируемой камеры) и превысит допустимое значение, то в магнитожидкостной пробке образуются каналы, через которые вещество из окружающей среды начнет проникать в камеру. Однако, как только давление уменьшится до допустимого значения, герметизатор вновь начнет выполнять свои функции плотной преграды.

Не следует думать, что герметизация глубокого вакуума магнитной жидкостью вообще не содержит проблем. Основная проблема — это испарение жидкости, особенно при повышенных температурах. В результате снижаются ресурсы работы герметизатора без технического обслуживания. Мы уже упоминали, что жидкости делают на специальных основах, скорость испарения которых в вакуум очень мала. Разработаны также специальные системы автоматической подзарядки герметизатора магнитной жидкостью.

Так как толщина h запирающего слоя жидкости мала (0,1—0,2 мм), то при высоких скоростях движе-

ния поверхности вала вязкая диссипация энергии становится значительной (напомним, что она пропорциональна $(v_0/h)^2$, где v_0 — линейная скорость герметизируемой поверхности). Если не отвести выделяющуюся теплоту, то жидкость начнет разогреваться и произойдет ее вскипание. Значит, для герметизации высокоскоростных валов должна быть разработана система принудительного охлаждения герметизирующего узла. Зато при проектировании магнитожидкостных герметизаторов для оборудования, работающего в области низких температур (например, турбогенераторов со сверхпроводящей обмоткой), можно использовать рабочую среду (пары гелия) в качестве хладагента.

Конструкции магнитожидкостных герметизаторов для организации вакуумного ввода принципиально не отличаются от аналогичных устройств для герметизации камер, работающих при повышенном давлении или содержащих такие среды, как водород, кислород, озон, а также пары, включающие различные жидкие и твердые примеси. В процессе эксплуатации герметизаторов с магнитной жидкостью не происходит их износа, что позволяет применять их в системах с высокими требованиями к чистоте герметизируемого объема. Например, такой герметизатор разработан для центробежного вентилятора, прокачивающего рабочую газовую смесь (CO_2 , N_2 , He) в мощном газодинамическом лазере.

Приведем еще один пример применения магнитожидкостного герметизатора для предотвращения попадания мельчайших частиц пыли (в том числе и табачного дыма) в дисковое устройство электронно-вычислительной машины. Помехи, вызываемые этими посторонними веществами на магнитной головке, могут привести к потере информации, а также к повреждению магнитной головки или вращающегося с большой скоростью вблизи нее магнитного диска. Чтобы умень-

шить количество частиц в дисковом устройстве, его заполняют гелием при небольшом избыточном давлении и ставят магнитожидкостный герметизатор, препятствующий попаданию частиц из внешней среды. Очень важное преимущество такого герметизатора состоит в отсутствии утечек через слой жидкости при останове и очередном пуске устройства, которые так характерны для эластомерных герметизаторов.

РАЗГОВОРЧИВ, КАК ЛЕТУЧАЯ МЫШЬ

Итальянский ученый Ладзаро Спалланцани в возрасте 64 лет заинтересовался способом ориентации ночных животных. Результаты проведенных им опытов с летучими мышами привели Спалланцани в 1799 г. (незадолго до смерти) к выводу о преобладающей роли слуха в ориентации летучих мышей. В 1937 г. в одной из лабораторий Гарвардского университета (США) был создан прибор, позволяющий исследовать звук в диапазоне от 10 до 80 кГц. Эти цифры означают, что за одну секунду источник звука совершает от 10 000 до 80 000 полных колебаний; при этом в среде, примыкающей к источнику, распространяется упругая волна, состоящая из поочередного сжатия и растяжения среды в направлении распространения волны. Упругие волны, частоты которых превышают 10—15 кГц, называются *ультразвуком*. Мы не слышим этих звуков, так как они не воспринимаются ухом человека. Именно с помощью прибора, созданного в Гарварде, Дональд Гриффин в 1938 г., еще будучи студентом-биологом, впервые обнаружил, что летучие мыши не являются «немыми», а издают множество звуков в ультразвуковом диапазоне.

Применение ультразвука в технике условно можно разделить на две области. Одна из них связана с исследованием свойств и с методами контроля разнообраз-

ных сред и процессов. Общее преимущество всех ультразвуковых методов состоит в возможности работы в активных средах, дистанционности и большой чувствительности, что приводит к ничтожно малым интенсивностям зондирующего сигнала (10^{-5} — 10^{-2} Вт/см²). Это в свою очередь позволяет проводить измерение без воздействия на свойства среды и характер контролируемого процесса. Другая область применений ультразвука основана на воздействии мощного ультразвука на вещество (ультразвуковое резание, сварка, диспергирование твердых и жидких материалов).

Для генерирования и приема ультразвука применяют разнообразные излучатели и приемники. Наиболее распространены электромеханические устройства, в которых ультразвуковая энергия получается преобразованием электрической энергии. Действие магнитострикционных преобразователей основано на периодическом изменении длины ферромагнитного стержня, помещенного в продольное магнитное поле, которое изменяется по синусоидальному закону. В резонансном режиме в стержне возникает стоячая волна частоты ω_n (ω_n — любая из собственных частот стержня). *Стоячая волна* — это волна, в которой колебания происходят, как и в «бегущей» волне, но эти колебания не перемещаются в пространстве; о собственных частотах колебаний мы уже говорили.

В пьезоэлектрическом излучателе резонансные продольные колебания пьезокварцевой пластинки возбуждаются переменным электрическим полем.

Общим недостатком электромеханических излучателей является возникновение усталостных напряжений, приводящих к их разрушению.

Мы уже видели, что распределение давления в неподвижной магнитной жидкости зависит от конфигу-

рации приложенного поля. Значит, изменяя периодически со временем градиент напряженности поля, можно возбудить в жидкости упругие колебания. Условие наступления резонанса определяется геометрией системы, если рассматривать границы объема жидкости как резонатор. В таком излучателе отсутствуют механические напряжения, и срок его работы не будет ограничиваться усталостными процессами.

Экспериментальное исследование резонансного режима генерации ультразвуковых колебаний в цилиндрическом резонаторе, заполненном магнитной жидкостью, показало высокую добротность системы, которая в отдельных случаях достигает значения, сравнимого с добротностью электромеханических излучателей (*добротность* характеризует быстроту затухания колебаний излучателя, когда они не поддерживаются извне).

Магнитные жидкости могут применяться также для генерации синусоидального сигнала по давлению вследствие линейной зависимости их намагниченности при малых напряженностях поля. Схема такого генератора изображена на рис. 37. Вместо диафрагмы используется капля магнитной жидкости в переменном магнитном поле, создаваемом соленоидом, через который проходит синусоидальный ток:

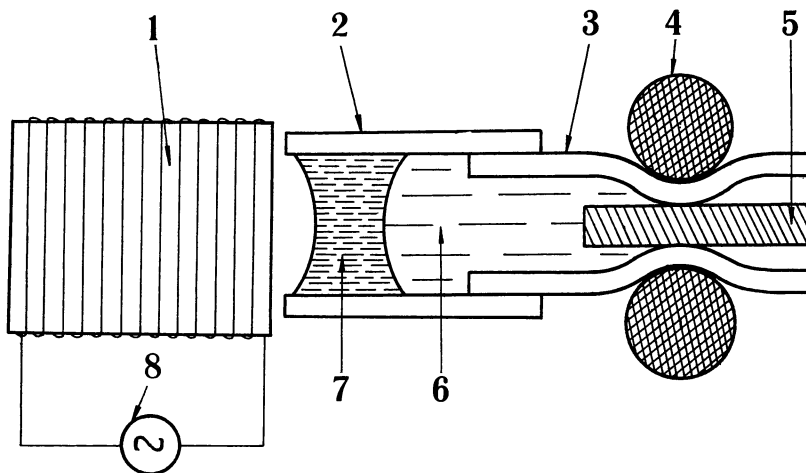
$$H = H_m \cos \omega t.$$

Действующую на единичный объем магнитную силу можно найти по формуле

$$F_M = \frac{\mu_0 \chi}{2} H_m^2.$$

Тогда сила, втягивающая каплю в область сильных полей, будет изменяться по закону

$$F_M = \frac{\mu_0 \chi}{4} + \frac{\mu_0 \chi}{4} H_m^2 \cos 2\omega t,$$



Р и с. 37. Генератор синусоидальных импульсов давления в жидкости:
 1 — электромагнит, 2 — полиэтиленовая трубка; 3 — резиновая трубка; 4 — кольцо;
 5 — датчик, 6 — вода, 7 — магнитная жидкость; 8 — источник тока.

а возвращающая сила создается атмосферным давлением.

Устройство оказалось работоспособным в диапазоне частот от 0 до 100 Гц и может применяться для динамической градуировки тонометров в клинических условиях. Ниже мы расскажем о других предложениях по применению магнитной жидкости в медицине.

ОБ ЭТОМ НЕ ЗНАЛ ГИППОКРАТ

Выдающийся врач Древней Греции Гиппократ одним из первых описал методы лечения различных болезней и особенно подробно — хирургические. Магнитные жидкости могут найти применение и в хирургии. Известно, что при операциях истечение крови из разре-

занных сосудов предотвращают с помощью специальных зажимов. Фиксация магнитной жидкости в области сильного поля, используемая в подшивниках и герметизаторах, может служить основой для «магнитожидкостного зажима». Если расположить постоянный магнит в том месте, где хирург должен делать разрез, то пробка из магнитной жидкости, введенной шприцем в вену или артерию, будет перекрывать ток крови после разреза.

Другие применения магнитных жидкостей в медицине связаны с ее движением под действием неоднородного магнитного поля. Например, можно перемещать с помощью поля в организме ферменты, заполняющие вместе со взвешенными магнитными коллоидными частицами мельчайшие полимерные сферы диаметром 0,2—2 мкм. После завершения химической реакции, для которой ферменты служат катализаторами, они отводятся также магнитным полем. Таким же способом можно концентрировать коллоидные частицы железа, что связано с проблемой локализации лекарственных препаратов. Возможность доставлять лекарство непосредственно к органу, который нуждается в нем в наибольшей степени, позволяет достичь высокой локальной концентрации и не дать препарату попасть в те области организма, в которые, возможно, ему попадать не следует.

Еще одно применение магнитной жидкости в медицине относится к лечению аневризмы головного мозга. Аневризма — выпуклость в стенках сосудов — может разрываться, что сопровождается кровоизлиянием и во многих случаях приводит к смерти больного. Хирургический метод лечения артериальной аневризмы весьма сложен и опасен. Другой путь — укрепление ослабленной стенки сосуда искусственным путем. Один из способов такого лечения — введение иглой коллоидного

раствора железа в аневризму и удержание его на стенке неоднородным полем маленького керамического магнита, который прикреплен к концу иглы. Магнитные частицы способствуют свертыванию крови на стенке аневризмы и образованию тромба, укрепляющего стенку.

Кроме того, известны предложения о применении магнитных жидкостей в качестве управляемого рентгеноконтрастного вещества и для исследования скорости движения крови.

УРОКИ СКОРОПИСИ

Прилежные студенты, записывающие все слова лектора, с удовольствием увеличили бы скорость написания своих конспектов. Как бы они ни тренировались, однако скорости современного телеграфного аппарата им все равно не достигнуть. Игла телеграфного аппарата успевает записать за одну минуту около 2000 строк, причем инженеры, разрабатывающие эти аппараты, стремятся увеличить количество строк до 5000. Препятствует этому механический способ нанесения чернил (в момент касания бумаги иглой чернила поступают из ее тончайшего капилляра): игла при такой скорости быстро ломается, кроме того, метка на бумаге получается не очень качественной.

Поэтому попробовали заменить контактную запись струйной и управлять отдельными каплями электростатическим полем. Но при записи этим способом возникла проблема: управляющее высоковольтное устройство в аппарате создавало электрические поля, которые воздействовали на заряженные капли во время их перемещения. Магнитное поле может управлять течением жидкости. Жидкости, реагирующие на магнитное поле, известны — это магнитные жидкости. На их основе

были приготовлены чернила. Струйка, вытекающая под давлением из питательного клапана, управляется двумя корректирующими соленоидами, создающими неоднородное поле в двух взаимно перпендикулярных направлениях. Время действия системы уменьшится, если дополнительно ввести элемент, разделяющий струю на отдельные капли. Устройство может работать по заданной программе с помощью контроллера, который координирует работу питательного клапана и отклоняющих блоков для поддержания оптимального режима записи. Скорость подачи жидкости легко регулируется давлением в канале, из которого она истекает, а возможность менять напряженность поля на соленоидах практически вообще не ограничена временными соображениями — она определяется скоростью изменения силы пропускаемого тока. Так что скорость «магнитного письма» намного выше обычного.

С действием магнитного поля на капельки магнитной жидкости связано еще одно ее применение. Теперь никого не удивит часы с индикатором на жидких кристаллах. Но, наверное, не все знают, что подобный индикатор можно сделать на магнитной жидкости. Магнитная жидкость (непрозрачная) перетекает из одной ячейки, заполненной прозрачной жидкостью, в другую под действием пульсирующего магнитного поля. Контактующие жидкости не смешиваются. В результате заполнения в заданном порядке ячеек каплями непрозрачной магнитной жидкости на индикаторе могут быть индуцированы числа от 0 до 9. Размеры отдельных блоков такого индикатора составляют всего лишь несколько миллиметров.

ЖАР КОСТЕЙ НЕ ЛОМИТ!

Ранее мы уже писали о создании вращающимся полем макроскопического движения магнитной жидкости. Назовем это движение *ротационным*, так как поле вовлекает весь объем жидкости во вращение (ротацию). Это движение магнитной жидкости можно использовать для охлаждения различных технических устройств, работающих при повышенных температурах.

Возьмем трехфазный электрический двигатель, вал которого может совершать полезную работу, например приводить во вращение насос, качающий воду из скважины. Нагрузка на валу определяет силу тока, питающего катушки статора двигателя, которая ограничена температурой разогрева обмоток. Предел по температуре устанавливается из условия сохранности изоляции обмотки. Если его превысить, то лишний «жар» приведет к растрескиванию изоляции, ее повреждению и в конечном счете к перегоранию обмотки из-за короткого замыкания. Для того чтобы снизить температуру обмотки, надо интенсивно ее охлаждать. Применение внешнего водяного охлаждения по сравнению с естественным воздушным резко интенсифицирует отвод теплоты от корпуса двигателя. Но в высоконагруженных двигателях, которые приводят в действие скважинные насосы или шахтные врубные комбайны, этого оказалось недостаточно. Чтобы уменьшить неравномерность охлаждения обмотки, а также снизить внутреннее тепловое сопротивление участка обмотка — корпус, ротор машины отделяют от статора герметичной перегородкой и заполняют образовавшуюся полость жидкостью. Снизив таким образом максимальную температуру обмотки, можно увеличить полезную мощность на валу.

Поиски возможностей увеличения полезной мощно-

сти опять привели к использованию в двигателях магнитной жидкости. Напомним, что катушки статора трехфазного двигателя создают вращающееся с постоянной скоростью магнитное поле, которое к тому же неоднородно по объему двигателя. Следовательно, если охлаждающая жидкость обладает магнитными свойствами, то она начнет вращаться вслед за полем. Оказалось, что это ротационное движение приводит к дополнительному понижению температуры обмотки статора, что позволяет увеличить нагрузку на валу двигателя. Такая конструкция электрической машины с использованием имеющегося магнитного поля для интенсификации теплопереноса гораздо проще конструкции, в которой на ротор ставят специальные лопасти, увлекающие жидкость во вращение.

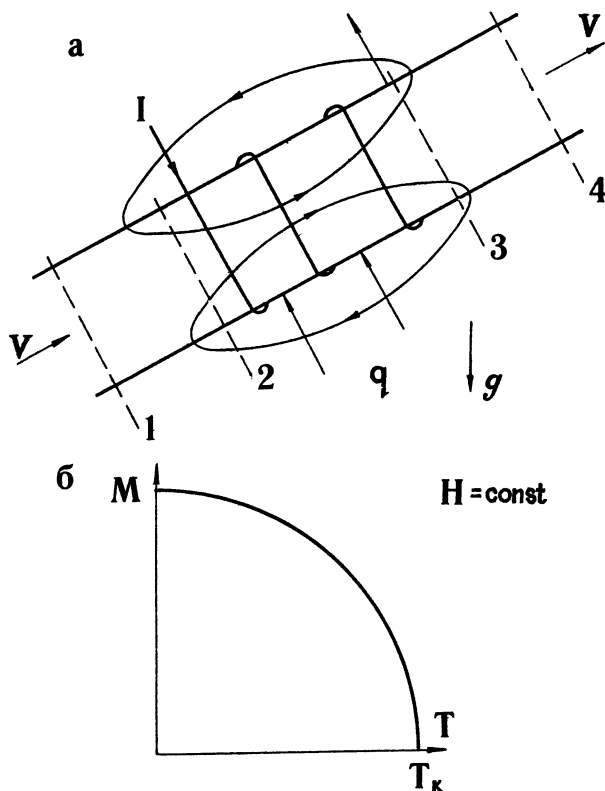
На этом примере наше знакомство с вращающимся магнитным полем заканчивается. Его действие позволило нам позабавить вундеркиндов, а также сконструировать электрическую машину, обладающую компактной системой охлаждения. Остается напомнить, что схема взаимодействия магнитных моментов и вращающегося поля сохраняется и при более распространенных физических условиях, когда частицы вращаются в потоке жидкости, а внешнее поле неподвижно.

КАК ТОЛЬКО БУДУТ СОЗДАНЫ ТЕРМОЯДЕРНЫЕ СТАНЦИИ

«Энергетический кризис!» — эта фраза, часто звучащая в последние годы, означает резкий разрыв между возрастающими потребностями современного общества в энергии и ограниченностью запасов «традиционных» видов топлива. Мировые запасы энергоресурсов при существующих темпах их добычи и потребления будут истощены к концу XX или началу XXI столетия. Только

развитие ядерной и термоядерной энергетики может обеспечить человечеству любые потребные ему количества энергии. Ранее мы уже говорили, что будущее, несомненно, принадлежит термоядерной реакции синтеза легких ядер в более тяжелые. В относительно «легко» осуществляемой реакции, протекающей при температуре порядка миллионов градусов, возможно взаимодействие ядер тяжелого водорода (дейтерия), а также дейтерия и трития (сверхтяжелого водорода). В последней реакции продуктами синтеза являются ядра гелия (α -частицы) и нейтроны. Эта реакция сопровождается выделением большого количества теплоты. Приведем лишь один пример, часто упоминаемый в наши дни: энергия дейтерия, содержащегося в одном стакане водопроводной воды, равна энергии, выделяющейся при сжигании 300 л бензина.

В одной из конструкций термоядерного реактора, предназначенного для управляемого синтеза, нагретая дейтерий-тритиевая плазма удерживается от соприкосновения со стенками тороидальной вакуумной камеры (иначе они расплавятся) магнитным полем. Для преобразования энергии нейтронов в теплоту и отвода ее к парогенератору вокруг зоны термоядерной реакции располагают так называемый *бланкет*, который предполагается заполнять жидким литием. Бланкет находится между стенкой вакуумной камеры и источником сильного поля — сверхпроводящими магнитами, следовательно, магнитное поле в бланкете уже имеется. Кроме того, в теплоносителе существует большая разность температур, которая поддерживается для отвода теплоты, интенсивно выделяющейся при термоядерном синтезе. Этих двух условий достаточно, чтобы создать преобразователь тепловой энергии в механическую, используя магнитную жидкость в качестве рабочей среды.



Р и с. 38. Схема участка контура и график зависимости $M(T)$, иллюстрирующая принцип непосредственного преобразования тепловой энергии в кинетическую энергию потока магнитной жидкости.

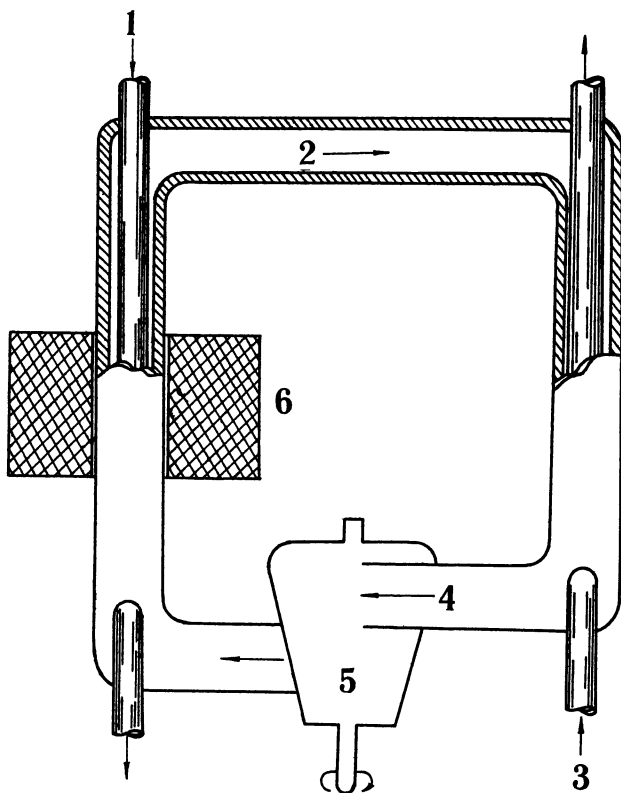
Преобразование становится особенно эффективным вблизи температуры Кюри. На рис. 38, а показана схема такого преобразования. Холодная жидкость поступает в сечение 1, и изотермический вход в маг-

нитное поле заканчивается в сечении 2. Затем при постоянном магнитном поле жидкость нагревается между сечениями 2 и 3. Выход изотермического потока нагретой магнитной жидкости завершается в сечении 4. Взаимодействие магнитного поля и холодной жидкости, намагниченность которой выше (см. зависимость M от T на рис. 38, б), приводит к повышению давления в ней p_1 по сравнению с давлением на выходе p_4 . Перепад давления и, следовательно, кинетическая энергия движущейся в замкнутом контуре жидкости будут тем выше, чем больше разность намагниченностей в сечениях 2 и 3. Движущаяся жидкость может совершать работу, если на ее пути поставить, например, турбину (рис. 39). Коэффициент полезного действия такого преобразователя будет повышаться с приближением температуры в сечении 3 к температуре Кюри, так как намагниченность жидкости стремится при этом к нулю. Другое условие эффективного преобразования — высокая напряженность внешнего магнитного поля.

Такие преобразователи, которые характеризуются значительным соотношением между вырабатываемой мощностью и массой генератора, могут найти применение и в космической технике.

Вследствие зависимости намагниченности от температуры также может возникнуть конвективное перемешивание неизотермической магнитной жидкости в замкнутом объеме: в неоднородном магнитном поле нагретые и холодные части жидкости втягиваются в область высокой напряженности с разной силой. Использование этого механизма наиболее перспективно для охлаждения тепловыделяющего элемента, генерирующего магнитное поле (мощные магнетроны, трансформаторы, силовые кабели) или находящегося в зоне магнитного поля (бланкеты термоядерных реакторов).

Теплообмен в магнитном поле будет усиливаться



Р и с. 39. Устройство для преобразования тепловой энергии в механическую:

1 — теплоноситель; 2 — нагретая магнитная жидкость; 3 — хладагент; 4 — охлажденная магнитная жидкость; 5 — турбина; 6 — магнит.

и при вынужденном движении магнитной жидкости, так как она при этом дополнительно перемешивается неоднородным полем.

СЕМЬ РАЗ ОТМЕРЬ...

В Международной системе единица силы тока — ампер — определяется как сила неизменяющегося тока, который, проходя по двум параллельным прямолинейным проводникам бесконечной длины и ничтожно малого кругового сечения, расположенным на расстоянии 1 м один от другого в вакууме, вызывал бы между этими проводниками силу, равную $2 \cdot 10^{-7}$ Н на каждый метр длины. Точность, с которой ампер воспроизводят, например, во Всесоюзном научно-исследовательском институте метрологической службы им. Д. И. Менделеева на токовых весах, в практических измерениях, конечно, не нужна. Измерять, однако, зачастую приходится силу тока, в тысячу раз большую, т. е. килоамперы. И тогда возникают проблемы не с точностью измерения, а с самим принципом действия электроизмерительных приборов.

Среди таких измерительных приборов можно выделить группу, где в качестве чувствительных элементов используются жидкости, например ртуть, электролиты, диэлектрики.

Например, силу электрического тока, проходящего через проводящую жидкость, можно найти, измеряя подъем жидкости в отводной трубке, расширяющейся в результате нагрева током. Эти приборы просты, дешевы, надежны: в них нет механических передач, устройств для создания противодействующих и успокаивающих сил.

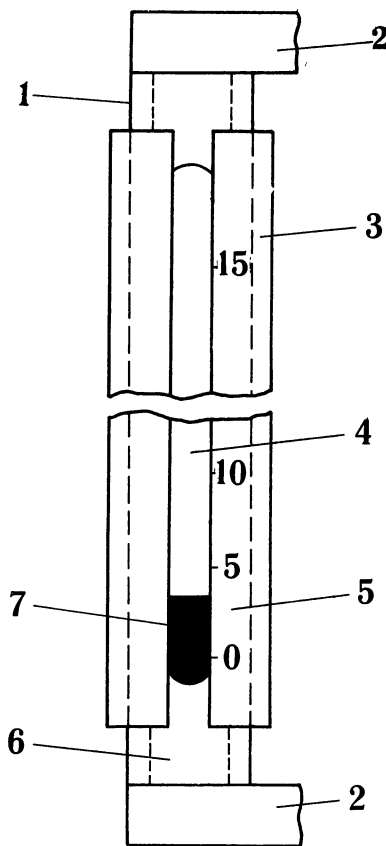
Известно, что в неоднородном магнитном поле на магнитное тело действует механическая сила. Первоначально это явление было использовано для измерения магнитных свойств жидких сред, когда о магнитных жидкостях еще не было известно. Устройство для измерения магнитной восприимчивости парамагнитных

жидкостей имело вид U-образной трубки, частично заполненной исследуемой средой. Одно колено с находящимся в нем столбиком жидкости помещается в неоднородное магнитное поле, создаваемое электромагнитом. Под действием поля жидкость перемещается в трубке так, что в коленях возникает разность уровней, по которой находится магнитная восприимчивость жидкости (так называемый *метод Квинке*).

Обратная задача выглядит так: зная магнитные свойства среды, по высоте ее подъема можно определить напряженность магнитного поля и, следовательно, силу тока, питающего электромагнит.

Магнитная жидкость как нельзя лучше подходит для этой цели. Ее относительная магнитная проницаемость существенно превосходит значения магнитной проницаемости парамагнетиков, что способствует увеличению точности измерений. Кроме того, магнитная жидкость удовлетворяет требованиям измерительной техники к стабильности свойств рабочей среды. К таким параметрам обычно относят: устойчивость в однородных и неоднородных полях; устойчивость в определенном диапазоне температур; временную устойчивость при данной температуре; повторяемость свойств при повторном получении по одной и той же технологии. Коэффициенты, характеризующие стабильность свойств магнитной жидкости при воздействии различных внешних факторов и ее качество, показывают перспективность применения магнитных жидкостей в измерительных устройствах различного назначения и позволяют определить ожидаемые интервалы для чувствительности и точности.

Одна из конструкций килоамперметра приведена на рис. 40. Она основана на явлении, схематически изображенном на рис. 28. Килоамперметр состоит из цилиндрического полого проводящего стержня, по-



Р и с. 40. Схема килоамперметра с магнитной жидкостью в качестве чувствительного элемента: 1 — проводник, 2 — токоподвод; 3 — магнитный концентратор, 4 — стеклянная трубка; 5 — измерительная шкала, 6 — цилиндрическая полость; 7 — магнитная жидкость.

крытого слоем магнитного материала, служащего магнитным концентратором. В концентраторе сделан продольный зазор, в котором установлена стеклянная трубка. В верхней и нижней точках трубка изогнута под прямым углом и герметически введена в полость проводника. Таким образом, трубка и полость образуют систему сообщающихся сосудов. Шкала для отсчета уровня наносится непосредственно на концентратор. Магнитная жидкость вводится во внутреннюю полость проводника в таком количестве, чтобы ее граница установилась против нуля шкалы. Из теории электричества известно, что при прохождении тока по такому проводнику напряженность магнитного поля внутри его полости будет равна нулю. В зависимости от силы тока, проходящего по проводнику, магнитная жидкость в трубке, расположенной в

поле проводника с током, будет подниматься на разную высоту. Расчеты показали, что высота этого подъема пропорциональна квадрату силы тока.

Другое применение магнитной жидкости в измерительной технике связано с определением положения твердой поверхности относительно горизонтали (уровнемер). Ампула, частично заполненная магнитной жидкостью, окружена системой катушек, образующих дифференциальный трансформаторный датчик. Датчик дает сигнал в зависимости от положения магнитной жидкости в ампуле. Это устройство позволяет определить уровень объектов, недоступных для визуального наблюдения.

«СВЕТ МОЙ, ЗЕРКАЛЬЦЕ, СКАЖИ...»

Из сказки хорошо известно, как важно, чтобы отполированная поверхность вносила минимальные искажения в изображение отражаемого предмета. Времена меняются, и, похоже, значительно более серьезные требования к оптике предъявляют не отдельные лица, с пристрастием рассматривающие свое изображение в зеркале, а целые отрасли промышленности, специализирующиеся на производстве оптических инструментов, без которых немислима современная техника.

Когда говорят о процессе полировки, то перед глазами сразу же возникает образ человека, легкими движениями трущего полируемый предмет мягкой тряпочкой, на которую нанесена паста. Компоненты этой пасты во многом зависят от того, из какого материала изготовлен предмет. Естественно, что для твердых материалов полировальная паста должна содержать весьма малые абразивные частицы, острые края которых в процессе перемещения по поверхности будут срезать различные микроскопические неровности, делая ее со временем все более гладкой.

Описанную картину, как нетрудно догадаться, можно наблюдать в домашних условиях при полировке специальной пастой мебели. В промышленных условиях полирование производится на станках, которые обеспечивают относительное перемещение обрабатываемой детали и полирующего материала. Не следует лишний раз говорить, что требования к качеству полирования особенно высоки при обработке деталей для различных оптических инструментов. Важно отметить, что, кроме гладкости оптической поверхности, которая характеризуется средним размером выступов и впадин на ней, особое значение для линз и зеркал, образующих оптическую систему, имеет строгое соответствие реальных геометрических параметров тем, которые были получены при расчетах.

Традиционный абразивный материал для полирования оптических поверхностей — это корундовые или полистироловые микронные частицы. С помощью тонкого слоя войлока эти частицы перемещаются вдоль обрабатываемой поверхности до тех пор, пока неровности поверхности не станут меньше некоторого заданного значения. При полировании плоской поверхности проблем с формой поверхности практически не возникает: необходимо использовать абразивные частицы требуемого размера и перемещать их в заданной плоскости. Положение несколько осложняется при полировании деталей, имеющих шаровую форму: сфера (поверхность шара), которая вращается вокруг оси, проходящей через геометрический центр, имеет разные линейные скорости в зависимости от расстояния до оси вращения (так, в точке пересечения оси и сферы линейная скорость вообще равняется нулю). Различие скоростей перемещения поверхности относительно полирующего материала приводит к неодинаковой степени обработки детали. В указанной выше точке сферы

(назовем ее по аналогии с Землей полюсом) процесс полирования вообще не происходит, так как нет перемещения полируемой поверхности относительно абразивных частиц. Это перемещение обычно создают путем качания оси вращения, которое компенсирует различие относительных скоростей в разных областях сферы. Такое сложное движение сферы обеспечивает равномерный съем материала по всей поверхности детали. Но этот прием «не работает», когда приходится полировать так называемые *асферические поверхности*, у которых кривизна изменяется от точки к точке. В этом случае сохранить требуемую форму поверхности при полировании можно только путем отдельного регулирования прижима полировального порошка.

Теперь вспомним, что магнитным полем легко воздействовать на немагнитное тело, если погрузить его в магнитную жидкость. Следовательно, с помощью того же неоднородного магнитного поля можно прижимать абразивные частицы к полируемой поверхности, «насыпав» их в магнитную жидкость (при условии, что полировальная смесь состоит из немагнитных абразивных частиц). Следовательно, создавая вполне определенную конфигурацию магнитного поля, можно обеспечить плавное изменение прижима частиц, которое необходимо для сохранения заданной формы поверхности. Заметим, что по всей поверхности детали магнитное поле должно уменьшаться при приближении к ней. Тогда немагнитные абразивные частицы будут выдавливаться из области сильного магнитного поля и прижиматься к полируемой поверхности. Остальное, как говорят, дело техники: задавая повышенную неоднородность магнитного поля там, где нужно снять больше материала, можно регулировать толщину снимаемого слоя, т. е. обеспечить требуемую асферичность поверхности. Нельзя, однако, сказать, что это достаточно

очевидное по эффективности предложение удалось легко реализовать в технологическом процессе. Прежде всего, возникла проблема создания универсального станка, на котором можно было бы обрабатывать детали разного профиля. Для этого магнитная система станка должна создавать поля различной конфигурации. Такая задача, поставленная практикой, была решена с помощью набора соленоидов, ток питания которых регулируется, что позволяет управлять конфигурацией магнитного поля.

Существует другое условие эффективности процесса полирования оптической поверхности — необходимость обработки поверхности водным раствором специального поверхностно-активного вещества (специального потому, что оно не имеет отношения к стабилизации магнитной жидкости). В то же время нам хорошо известно, что в магнитной жидкости из области сильного магнитного поля выдавливаются любые немагнитные материалы, твердые или жидкие. Следовательно, специальное поверхностно-активное вещество будет концентрироваться вблизи полируемой поверхности и способствовать разрушению приповерхностного слоя детали.

При обработке поверхности весьма нежелательно, чтобы отходы полирования смешивались с магнитной жидкостью, расположенной вблизи обрабатываемой поверхности, так как это приводит к загустению жидкости и понижению ее магнитных свойств. Кроме того, необходимо время от времени обновлять сам абразивный порошок в зоне полирования. Но, как обычно случается, технические проблемы стимулируют поиск новых инженерных решений, которые и были предложены технологами. Так, магнитную жидкость стали отделять от полировальной смеси тонкой эластичной пленкой. Тогда градиент давления в жидкости, возни-

кающий под действием неоднородного магнитного поля, вызывает разный прогиб пленки в зависимости от неоднородности приложенного поля, что создает соответствующее давление на полировальную смесь, расположенную между пленкой и обрабатываемой поверхностью.

ИНФОРМАЦИЯ К РАЗМЫШЛЕНИЮ

- Вы узнали о различных областях, в которых находят применение магнитные жидкости. Прежде чем дать вам возможность попытаться самим придумать что-нибудь новое, сообщим в краткой форме о других известных предложениях. Начнем с устройства, в котором электрическая энергия преобразуется в механическую. Оно состоит из эластичной капсулы, заполненной магнитной жидкостью, с помещенной в нее маленькой катушкой, по которой можно пропускать ток. Когда ток проходит по катушке, ее магнитное поле перераспределяет жидкость в капсуле, что приводит к искажению ее формы, например в радиальном направлении она растягивается, а в осевом сжимается. Эти устройства найдут широкое применение как искусственные мускулы для протезов. Их преимущество по сравнению с обычно используемыми соленоидами, содержащими перемещающийся сердечник, заключается в отсутствии трущихся деталей и увеличении действующей силы при максимальном размахе протеза.

Полная цепь для кварцевых электронных часов может содержать до тысячи транзисторов, и каждый из них должен проверяться пять или шесть раз. Чтобы отметить неработающий узел, на него наносят шприцеобразным устройством магнитную жидкость и бракованную деталь извлекают с конвейера устройством с постоянным магнитом. Этот прием позволяет заме-

нить ручную сортировку пинцетом на механическую.

Магнитная жидкость применяется для визуализации микроструктуры ферромагнитных материалов. Тонкий слой жидкости наносится на исследуемый образец и покрывается стеклянной пластиной. В соответствии с распределением магнитного поля над поверхностью микроскопического объекта магнитная жидкость сосредоточивается в областях максимальной напряженности, которые хорошо видны в объектив микроскопа. Для визуализации записи на магнитной ленте применяют магниточувствительные эмульсии с микронными каплями магнитной жидкости, взвешенными в близкой по плотности и не смешивающейся с ними немагнитной жидкости. Распределение таких капель на поверхности ленты под действием магнитного поля записанных на ней сигналов позволяет измерять магнитное поле рассеяния. Другой способ визуализации магнитной записи — фотографирование рельефа, образованного магнитной жидкостью на пленке.

Электрические переключатели без механических узлов изготовлены на основе электропроводящей жидкости, замыкающей контакты, и более легкой, не смешивающейся с ней магнитной жидкости, которая отесняет электропроводящую жидкость от контактов по сигналу внешнего электромагнита.

Из процессов, основанных на применении магнитных жидкостей, надо прежде всего упомянуть очистку воды от загрязнения маслом, нефтью и т. п. Вспомните о катастрофах нефтеналивных судов — растительность и животный мир обширных районов моря и суши погибали под действием расплывающейся нефти. В последнее время предложен простой способ собирать нефть с поверхности океана. Над загрязненным участком распыляется магнитная жидкость на основе керосина, которая хорошо растворяется нефтью и не сме-

шивается с морской водой. Тонкая пленка нефти становится магнитной и легко собирается специальным устройством с постоянным магнитом. Такое переносное устройство массой 88 кг сконструировано для сбора загрязнений вокруг заправочных доков и приспособлений для хранения нефти. Очистка трюмных и балластных вод на кораблях, технической воды в промышленности может быть осуществлена по этому же принципу. Магнитная жидкость, основа которой родственна загрязнениям, добавляется в очищаемую воду, и полученная смесь пропускается через магнитный фильтр, в котором полем задерживается магнитная составляющая смеси и свободно проходит вода, пригодная для дальнейшего использования в процессах прокатки, травления и т. п.

Большие надежды возлагают на магнитную жидкость и в газоперерабатывающей промышленности. Новые месторождения нефти обычно находятся в отдаленных, труднодоступных местах, в которых отсутствуют условия для строительства перерабатывающих заводов. Поэтому попутный нефтяной газ нужно отводить к ближайшим промышленным районам. Однако расположены они не так уж близко. Чтобы газ беспрепятственно передвигался по трубам на довольно большие расстояния, необходимо подготовить его к дальней дороге. Для этого прежде всего следует извлечь из него тяжелую фракцию, которая легко конденсируется и закупоривает трубопровод. Сейчас с этой целью применяют крупногабаритные массообменные аппараты, в которых стекающий по насадкам различной геометрической формы керосин соприкасается со встречной струей газа, «впитывая» тяжелую фракцию. Производительность этих аппаратов мала, так как с увеличением скорости газа наблюдается срыв стекающих пленок поднимающимся газовым потоком.

Чтобы увеличить производительность, нужно было найти способ стабилизировать стекающие пленки. Это можно осуществить с помощью магнитного поля, если жидкость обладает магнитными свойствами. Ранее было показано, что поле для этого направляется по касательной к поверхности раздела жидкости и газа. Выращивание «ежей» на поверхности тоже может оказаться полезным — таким образом увеличивается площадь контакта между жидкостью и газом, что повышает производительность аппарата. А сделать магнитную жидкость на основе керосина, как вы знаете, не так уж сложно...

В заключение вернемся к проблемам трибоники. Мы уже упоминали о преимуществах магнитной смазки. Перечислим обычные способы сохранения смазки в узле трения: установка механических герметизаторов, маслосборников, фитилей, прокачивание или разбрызгивание смазки, обработка поверхностей для предотвращения просачивания смазки и т. п. Если смазку в зоне контакта удерживать магнитным полем, конструкции узлов трения значительно упростятся. В настоящее время с помощью магнитной смазки проводится конструктивное совершенствование шарниров, вращающихся стержней, шариковых подшипников, зубчатых передач, поршней.

Наконец, мы ничего не сказали о совершенно новом члене магнитожидкостной семьи. Этот новорожденный — *супердиамагнитная жидкость*. Поскольку его «рождение» связано с появлением новых диамагнетиков — высокотемпературных сверхпроводников, то о нем, пожалуй, стоит сказать несколько слов.

Мы уже говорили о том, что сверхпроводники также проявляют сильные магнитные свойства, но в отличие от других сильных магнетиков — ферромагнитных материалов — они являются диамагнетиками. Эти свой-

ства обусловлены эффектом Мейсснера — способностью сверхпроводников выталкивать из себя магнитное поле, когда их температура ниже некоторой, называемой критической, а само поле также не превышает некоторой критической величины.

Подобно тому, как магнитные материалы послужили основой для создания магнитных жидкостей, нет никаких препятствий, чтобы создать новую жидкость, обладающую сильными магнитными свойствами, на основе сверхпроводящих материалов. И такая новая магнитная жидкость появилась почти одновременно с появлением «новых» высокотемпературных сверхпроводников. Может, конечно, возникнуть вопрос: почему для появления диамагнитных жидкостей нужно было дожидаться открытия высокотемпературной сверхпроводимости? Ответ здесь достаточно ясен: «старые» сверхпроводники имели слишком низкую критическую температуру и создавали предпосылки для синтеза диамагнитной жидкости только при температуре жидкого гелия, т. е. в очень узком температурном интервале, примыкающем к абсолютному нулю. Так или иначе, но диамагнитные жидкости связаны с открытием сверхпроводящей керамики, для которой, как мы уже знаем, температура кипения азота лежит ниже (на десятки градусов) их критической температуры сверхпроводящего перехода.

При создании диамагнитной жидкости возникли проблемы, близкие к тем, которые сопровождали появление магнитных жидкостей, а учитывая специфику, вносимую в решение задачи особенностями сверхпроводников и низкими температурами, можно уверенно сказать, что проблемы были не менее сложными.

Первый вопрос, который предстояло решить, — это выбор размера частиц. Критерий, определявший размер частиц в магнитных жидкостях, сохранялся. Час-

тицы должны быть броуновскими, т. е. их хаотическое движение должно превалировать над их «падением» в гравитационном поле Земли. Проще говоря, частицы не должны оседать, или, выражаясь научно, седиментировать. Это определяло верхнюю границу для размера частицы: действительно, если масса частицы слишком велика, она «утонет». Задача на первый взгляд кажется чисто технической — достаточно довести размеры частиц до броуновских, и дело сделано. Но тут-то и проявляется специфика, связанная со сверхпроводимостью. Сверхпроводник действительно выталкивает магнитное поле из своего объема, но не до конца. Существует уже упоминавшийся лондоновский слой, в который магнитное поле все-таки проникает. Слой этот достаточно тонок — толщина его не превышает двух-трех тысяч ангстрем. Но если тысяча ангстрем для частицы, размер которой, скажем, миллиметр,— пустяки, то для частицы, собственные размеры которой не превышают десяти тысяч ангстрем, лондоновский слой может оказаться весьма существенным, настолько, что займет почти весь или даже весь ее объем.

Что же дают конкретные оценки? К счастью, баланс двух противоположных требований к размеру частиц, хотя и очень тонкий, оказался благоприятным для диамагнитной жидкости. Выяснилось, что частицы керамики размером в 10 мкм являются еще броуновскими и в то же время их поперечный размер достаточно велик, чтобы быть больше удвоенной толщины лондоновского слоя. Итак, сто тысяч ангстрем — это именно тот ориентир, который оказался пригодным для частиц сверхпроводящей керамики, чтобы удовлетворить предъявляемым к ним требованиям.

Чем же диамагнитная жидкость отличается от тех магнитных жидкостей, которые описаны в предыдущих

главах? Таких отличий несколько, и связаны они, главным образом, с магнитными свойствами. Магнитные жидкости, как уже говорилось,— это суперпарамагнетики. Однодоменные магнитные частицы, взвешенные в жидкой основе, попадая во внешнее магнитное поле, испытывают его воздействие, которое сводится к ориентации магнитных моментов вдоль поля (если поле однородное). Этому ориентационному воздействию противостоит разориентирующее влияние теплового хаотического движения частиц. Конкуренция этих двух факторов и определяет намагниченность магнитной жидкости. Чем сильнее поле, тем больше частиц выстраивает свои дипольные моменты вдоль него, но ясно, что когда все частицы соригентируются вдоль поля, то наступит насыщение. Сколько ни увеличивай поле после этого, намагниченность не возрастет. А что же происходит в диамагнитной жидкости? С магнитной точки зрения различие огромное: при наложении поля на сверхпроводящую частицу в ней возникает момент, пропорциональный напряженности поля и направленный, конечно, в точности против поля (ведь это диамагнетик!). Такая зависимость магнитного момента, индуцируемого в сверхпроводящей частице внешним полем, как раз и составляет главное отличие диамагнитной жидкости от магнитной. Оно означает, что вплоть до критического значения магнитного поля, по достижении которого вместе со сверхпроводящим состоянием исчезает и сам диамагнетизм, намагниченность диамагнитной жидкости будет расти, а насыщения, характерного для жидкости магнитной, в ней попросту не будет.

Небезынтересно оценить порядки величин, характеризующих магнитное состояние диамагнитной жидкости в сравнении с магнитной. При насыщении типичное значение намагниченности магнитной жидкости

составляет порядка 100 Гс, причем оно достигается в полях меньше 1 Тл. Поскольку в диамагнитной жидкости насыщения нет, можно вести речь о максимальной намагниченности при наибольшем значении магнитного поля, когда еще имеет место диамагнитный эффект. Из экспериментов известно, что высокотемпературные сверхпроводники характеризуются очень большими значениями критических полей, которые достигают порядка 100 Тл.

Таким образом, намагниченность диамагнитной жидкости может быть на порядок (а в иных случаях и на два порядка) больше, чем магнитных жидкостей.

Чтобы охарактеризовать восприимчивость диамагнитной жидкости, скажем, что она по модулю достигает 10^{-3} — 10^{-2} , что на 3—4 порядка больше, чем магнитная восприимчивость естественных диамагнетиков.

Наконец, еще одно важное отличие диамагнитных жидкостей от их суперпарамагнитных собратьев состоит в том, что основой для них служит жидкий азот, область существования которого лежит ниже 77,4 К. Это настолько низкие температуры, что все известные основы, используемые при синтезе магнитных жидкостей, в этом температурном интервале замерзают, так что магнитные жидкости при столь низких температурах существовать просто не могут.

Нетрудно понять, каково будет различие в поведении диамагнитной и магнитной жидкостей в неоднородном магнитном поле (а это понять необходимо, если говорить о практических применениях диамагнитных жидкостей). Как мы помним, магнитная жидкость, попадая в неоднородное магнитное поле, втягивается в те области пространства, где напряженность магнитного поля выше. Поскольку магнитная проницаемость парамагнетиков и диамагнетиков различается знаком (отрицательна для диамагнетиков и положительна

для парамагнетиков), можно сказать, что диамагнетики — это парамагнетики «наоборот». По этой причине и диамагнитная жидкость в неоднородном магнитном поле будет вести себя «наоборот»: те области, в которых напряженность магнитного поля выше и которые «привлекательны» для магнитной жидкости, для жидкости с диамагнитными свойствами будут служить местами «нежелательного пребывания»: она будет выталкиваться полем из этих областей. И хотя, на первый взгляд, разница невелика (опять же с точностью до «наоборот»), с физической точки зрения, как, впрочем, и с точки зрения возможных приложений, ситуация меняется существенно, особенно при рассмотрении поведения той или иной конфигурации жидкости в магнитном поле.

Казалось бы, при снятии внешнего поля диамагнитные и магнитные жидкости утрачивают различие, но нет. Без поля высокотемпературная керамика своих магнитных свойств проявить не в состоянии, тогда как магнитные частицы продолжают оставаться маленькими магнитами. Говоря о практических применениях диамагнитной жидкости, можно лишь отметить, что у нее есть определенные перспективы стать новым теплоносителем в области криогенных температур, но для этого предстоит еще немало поработать.

Наш рассказ о твердых и жидких магнитах подошел к концу. Успехи, достигнутые учеными и инженерами в познании природы магнетизма и создании новых магнитных материалов, — а мы, разумеется, сумели рассказать далеко не обо всех — эти успехи, без сомнения, впечатляют. Однако нам меньше всего хотелось, чтобы у читателя возникла иллюзия завершенности исследований в этой области. Как и всегда в науке, решение одних проблем порождает десятки новых, открытие не только отвечает на вопросы, но и задает их,

количество задач нарастает лавинообразно, и этой лавине не видно конца.

Одной из интереснейших проблем магнетизма, не имеющей пока достаточно строгого решения, является существование точки Кюри — температуры, выше которой магнит внезапно утрачивает свои свойства. Физики установили, что у этого явления имеются «близнецы». Это так называемые фазовые переходы второго рода. К ним относятся, в частности, переходы в *сегнетоэлектриках* — материалах, удивительно напоминающих ферромагнетики, но в отличие от них приобретающих не магнитный, а электрический момент и не в магнитном, а в электрическом поле (по-английски они даже называются *ferroelectrics* — «ферроэлектрики»). Много общего обнаруживают ферромагнетики вблизи точки Кюри и с поведением жидкостей в окрестности критической точки жидкость — пар (это точка, выше которой утрачивается различие между жидкостью и паром). Мы ничего не сказали о явлении *магнитного резонанса* — способности магнитных материалов особым образом откликаться на переменное магнитное поле определенной частоты. Этот метод, связанный с магнитными свойствами вещества, служит мощным инструментом исследования характеристик вещества, с магнитными свойствами никак не связанных.

Ничего не было сказано и о редкоземельных элементах, в которых магнитные моменты расположены удивительным образом: эти металлы в магнитном отношении как бы разбиты на слои, причем в пределах одного слоя все магнитные моменты параллельны друг другу и лежат в плоскости слоя. В соседнем слое картина такая же, но направление магнитных моментов уже несколько иное, чем в предыдущем. В результате от слоя к слою вектор намагниченности слегка поворачивается, как бы накручиваясь по спирали. Такие

спиральные структуры обнаруживают массу интересных свойств при помещении в магнитное поле. И, конечно, не надо забывать о том, что всякие новые физические свойства влекут за собой и новые приложения, связанные с практическим использованием магнитных материалов.

Глубокое проникновение в тайны магнетизма, выяснение причин, вызывающих это удивительное явление, позволило человеку, опираясь на разнообразие предоставленных природой элементов, создать материалы, которых в природе не существовало. В этом творческом процессе объединяют свои усилия физики, химики, металлореды и металлурги. Создание новых магнитных материалов — дело далеко еще не законченное. Это относится в равной степени как к твердым, так и к жидким магнитным веществам. Физические и химические исследования, раскрывая новые закономерности в формировании магнитных структур и материалов, дают в руки технологов новые рецепты приготовления сплавов и жидкостей с требуемыми магнитными свойствами. В свою очередь поиски технологов выдвигают перед исследователями новые нерешенные задачи. Теория, эксперимент и практика, взаимодействуя, движутся вперед, и цель у них одна: познавать природу и использовать полученные знания на благо людей.

А тем временем миллиарды магнитов, больших и малых, твердых и жидких, несут свою бессменную вахту, обеспечивая человечество энергией, средствами связи и управления, всем, без чего сегодня невозможно представить жизнь людей на Земле.

ОГЛАВЛЕНИЕ

МАГНИТЫ КАК МАГНИТЫ

Из глубины веков	4
Разъятый на части	16
Бег по кругу	22
Ток, который никогда не затухает	27
Близнецы, или Игра в прятки	37
Похожие на водород	47
Землевладение в эпоху феодализма	60
Чем топят печь?	67
Слово и дело	84
«Алло, вы меня слышите?», или Петля гистерезиса	98
Не только магнитная стрелка	107

МАГНИТЫ, КОТОРЫЕ ТЕКУТ

Опилки для двигателя	118
Как готовят майонез	119
Немного о самостоятельности	127
Равняйся, смирно!	136
Кому нужна мнимая часть?	147
Когда в товарищах согласие есть...	152
Луч света в темном слое	154
Как вырастить ежа	159
В репертуар иллюзиониста	177
Учтем невидимое	183
Юла для вундеркинда	194

«ЕЖ» ЗА РАБОТОЙ

Сведения для золотоискателей	202
Вращайтесь без касаний!	205
В стиле «диско».	209
Советы спринтеру	214

Природа не терпит пустоты	217
Разговорчив, как летучая мышь	221
Об этом не знал Гиппократ	224
Уроки скорописи	226
Жар костей не ломит!	228
Как только будут созданы термоядерные станции	229
Семь раз отмерь...	234
«Свет мой, зеркальце, скажи...»	237
Информация к размышлению	241

Научно-популярное издание

Брук-Левинсон Эдуард Теодорович
Фертман Вячеслав Ефимович

«ЕЖ» В СТАКАНЕ

**Магнитные материалы:
от твердого тела к жидкости**

Заведующий редакцией

Л. Д. Духвалов

Редактор

Е. В. Сукач

Художник обложки

В. С. Жаркевич

Художественный редактор

Ю. С. Сергачев

Технический редактор

М. Н. Кислякова

Корректор

И. И. Ганелес

ИБ № 3153

Сдано в набор 15.11.90. Подписано в печать 31.05.91. Формат 70×108/32. Бумага тип. № 2. Гарнитура литературная. Офсетная печать. Усл. печ. л. 11,2. Усл. кр.-отг. 11,55. Уч.-изд. л. 11,22. Тираж 10600 экз. Зак. 865. Цена 1 р. 30 к.

Издательство «Высшая школа» Государственного комитета БССР по печати. 220048, Минск, проспект Машерова, 11. Минский ордена Трудового Красного Знамени полиграфкомбинат им. Я. Коласа. 220005, Минск, ул. Красная, 23.

- Брук-Левинсон Э. Т., Фертман В. Е.**
Б 89 «Еж» в стакане: Магнит. материалы: от твердого тела к жидкости.— 2-е изд., перераб. и доп.— Мн.: Выш. шк., 1991.— 253 с., ил.— (Мир занимат. науки.)
ISBN 5-339-00588-7.

В популярной форме рассказывается об истории исследования и природе магнетизма, об естественных и искусственно созданных магнитных материалах. Особое внимание уделено магнитным жидкостям, удивительные и во многом уникальные свойства которых дали название книге.

Первое издание вышло в 1983 г.

Для всех, кто увлекается историей и проблемами естествознания, техники и технологии.

1604050000—061
Б ————— 102—91
М304(03)—91

ББК 22.334

1 р. 30 к.

Издательство „Вышэйшая школа”