ПРОБЛЕМА СИЛЬНЫХ МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ И РАБОТЫ П. Л. КАПИЦЫ.

Я. Г. Дорфман, Ленинград.

Введение.

Вряд ли будет преувеличением, если сказать, что магнитные явления представляют собою до сих пор наименее разработанную область физики. Последние десятилетия вскрыли много новых магнитных явлений, показали теснейшую связь магнетизма с наиболее фундаментальными законами, управляющими строением атомов и молекул; вопросы строения металлов, вопросы химической валентности оказались по существу почти вопросами магнитными. Все эти данные расширили горизонт казавшейся многим почти бесплодной и „узкой" области магнетизма, но не разъяснили накопившегося экспериментального материала.

Одною из главных трудностей при исследовании магнитных явлений оказывается их сравнительная малость. Оставляя в стороне ферромагнитные явления, приходится сказать, что магнитные свойства для своего изучения требуют необычайно утонченных средств. Большинство этих явлений начинают быть обычно наблюдаемыми в магнитных полях силою в 10 000—20 000 гаусс, между тем наиболее сильные, доступные для исследователей поля не превышают 30 000—40 000 гаусс. Изучение воздействия магнитного поля на различные процессы может быть тем плодотворнее, чем шире диапазон вариируемых полей. Поэтому, очевидно, магнитные исследования могут развиваться в двух направлениях: 1) в направлении увеличения чувствительности методов с тем, чтобы

иметь возможность наблюдать магнитные явления уже в слабых полях и 2) в направлении увеличения силы магнитных полей. Второй путь еще тем более интересен, что в крайне сильных магнитных полях мы можем ожидать проявления новых свойств, качественно новых явлений. В самом деле можно с уверенностью ожидать, что в поле 10^6—10^7 гаусс мы смогли бы наблюдать магнитное насыщение у многих парамагнитных веществ; далее, как можно предсказать из магнитооптических данных, поля этого порядка величины способны вызвать глубочайшую пертурбацию движения электронов в атомах и молекулах. Вследствие этого проблема получения сильных магнитных полей представляет собой огромный интерес.

Каким же путем можно рассчитывать на получение столь сильных полей? Увеличение силы тока в современных электромагнитах или изменение формы полюсов не может дать никаких существенных результатов; здесь максимум — поле 7×10^4 гаусс, но в объеме около 1 *мм*^{3}, т. е. практически им воспользоваться невозможно. Этот объем можно увеличить, лишь значительно увеличивая самые размеры электромагнита. В настоящее время в лаборатории Коттона в Париже по расчетам Коттона и П. Вейсса заканчивается гигантский электромагнит, весом в 100 *т*, поперечное сечение сердечников которого составляет 1 *м*^{2}. В этом электромагните ожидается получение 100 000 гаусс в объеме, в котором вполне удобно исследовать различные вещества. Во всех этих электромагнитах их максимум поля ограничен насыщением железа или железо-кобальта [1]. Одним из путей увеличения поля было бы изыскание иных материалов для сердечников. Но до сих пор неизвестно, существуют ли ферромагнитные вещества помимо семейства металлов железной группы. Есть основание думать, что ферромагнетизм существует среди группы так называемых редких земель, но изучение их до сих пор тормозится трудностью получения этих веществ в металлическом состоянии. Получение их в больших коли-

---

[1] Железо-кобальт имеет на 10% более высокое насыщение, чем железо.

чествах во всяком случае крайне затруднительно, ввиду их редкости и ценности. Даже в случае, если бы среди этих веществ нашлись ферромагнитные металлы, то можно почти с уверенностью сказать, что замена ими железа (или Fe—Co) в обычных электромагнитных и даже электромагните Коттона повысила бы магнитное поле не более как до 200—400 $\times 10^3$ гаусс. Хотя этот путь несомненно представляет собою очень большой интерес, им пока по причинам материального характера никто из исследователей итти не может.

Но если в электромагнитах с сердечником верхний предел поля налагается величиной насыщения материала сердечника, то принципиально беспредельными являются возможности генерирования поля посредством соленоида без сердечника. Однако для этого нужны огромные токи, вызывающие значительное выделение тепла. В таком случае кардинальным является вопрос охлаждения соленоида. Устройство соленоида уже на 25 — 45 $\times 10^3$ гаусс представляет собою серьезные технические затруднения. Деландр и Перо осуществили соленоид, дававший в объеме около 0,1 *см*^{3} поле до 60 000 гаусс. Затрата энергии составляла около 500 kW. Дальнейшего улучшения предполагали достигнуть различными путями. При открытии явления сверхпроводимости полагали возможным сделать соленоид из сверхпроводника, но эта мысль оказалась утопией, ибо сверхпроводимость исчезает совершенно уже при очень небольших полях (100—200 гаусс). Естественной была другая мысль, высказанная впервые Перреном об охлаждении соленоида жидким воздухом. Самое понижение температуры до — 180° С должно было понизить сопротивление обмотки примерно вдвое. Фабри подверг эту мысль тщательному расчету и показал, однако, что для получения 100 $\times 10^3$ гаусс в соленоиде внутреннего диаметра в 1 *см* расход жидкого воздуха составлял бы 24 *л/сек* при мощности источника тока в 400 kW. Следовательно и мысль использовать жидкий воздух неосуществима на практике.

Иным путем пошли П. Л. Капица и Уолл. Они оставили мысль о создании магнитных полей длительное время и перешли к созданию сильнейших мгновенных магнит-

ных полей. Поскольку почти все молекулярные процессы устанавливаются приблизительно в течение 10^{-8}—10^{-12} *сек*, достаточно, если поле существует в продолжение 10^{-3} *сек*, чтобы уже эти процессы происходили совершенно так же, как в постоянном поле. Разумеется, самая методика измерений полей и наблюдения явлений должна быть в таком случае приспособлена к малым интервалам времени.

Создание мощных мгновенных разрядов возможно, конечно, осуществить самыми разнообразными способами. Поле в 1 000 000 гаусс требовало бы 50 000 kW. Если, однако, создать поле на короткие промежутки времени, то можно обойтись и значительно менее мощным источником; для этого необходимо лишь, чтобы в промежутки времени между работой соленоида удавалось каким-нибудь путем накапливать энергию, а затем при разрядке выпускать накопленный запас.

Простейшим из таких способов является метод разряда конденсатора, осуществленный впервые (хотя и в крайне несовершенном виде) Уоллом. В его установке имелось несколько конденсаторов, каждый на 50 μF (при 2 000 V напряжения). Эти конденсаторы заряжались от небольшого генератора (20 W), соединенного последовательно с аккумуляторной батареей до 2 200 V. В зарядную цепь включено большое сопротивление, дабы избежать чрезмерного возрастания тока при зарядке. Зарядка продолжалась несколько минут. Затем емкости разряжаются через соленоид, находящийся в масле. Дабы избежать поломки соленоида, вследствие огромных механических сил, возникающих между витками у Уолла, соленоид укреплялся в особой раме. Сила тока в соленоиде и напряжение измерялись осциллографом. Однако в установке Уолла имелись два серьезных недочета: во-первых, не было принято мер к тому, чтобы ток в осциллографе изменялся так же, как в соленоиде, т. е. не было никакой гарантии, что осциллограммы соответствовали току, и, во-вторых, получался быстро переменный колебательный разряд, применить который для каких-либо исследований было невозможно.

По расчетам П. Л. Капицы метод разрядки конденсатора мог бы быть применен для генерирования сильных мгно-

венных полей, причем требовалась бы емкость в 20 μF, заряжаемая до 50 000 V. Другие два метода были с успехом предложены и осуществлены П. Л. Капицей.

Первый метод заключается в мгновенной разрядке аккумуляторов специальной конструкции. Обратимся к более детальному его описанию.

Метод разрядки аккумуляторов.

Для получения коротких и мощных разрядов необходимо было соорудить специальную аккумуляторную батарею. Каждая батарея состояла из 71 свинцовой пластины 35 × 35 *см*² площадью и 1,5 *мм* толщиной. Эти пластины отделялись друг от друга эбонитовыми пробками. По наружному краю между пластинами находились еще узкие резиновые прокладки. Таким образом пространство между двумя пластинами представляло собою как бы плоский сосуд, закрытый с двух сторон резиной и с резиновым дном, наполнявшийся 30%-ным раствором серной кислоты. Каждая свинцовая пластина ограничивала собою два соседних сосуда. Каждый сосуд представлял собою аккумулятор, так что при пропускании тока через батарею каждая свинцовая пластина с одной стороны заряжалась положительно, с другой — отрицательно. Толща свинца представляла собою соединительный проводник между отдельными аккумуляторами. Поскольку ток шел через тонкие слои кислоты и через свинцовые пластины перпендикулярно к поверхности, сопротивление такой батареи оказывалось крайне малым — 0,02 Ω. Таких батарей было 4, и они были соединены друг с другом параллельно. Они заряжались током в 2—3 A от 220 V. При разрядке можно было получать около 1 000 kW, причем ток достигал 7 000—10 000 A.

При исследовании изменения разрядного тока от времени при различных сопротивлениях проводника, которым замыкалась цепь, оказалось, что при внешнем сопротивлении 0,025 Ω в первую 0,01 *сек* можно было получать значительную мощность, но ток быстро спадал. При сопротивлении, большем 0,025 Ω, ток спадал медленнее, но мощность была меньше.

Первым затруднением в этих работах являлась необходимость быстрого включения и выключения тока порядка 10 000 А. Это затруднение было преодолено следующим образом. Сначала заряжались батареи. Цепь от аккумуляторов к соленоиду заключала в себе один специальный рубильник и последовательно ему второй специальный рубильник, зашунтированный тонким проводом. Рубильники представляли собою весьма сложные механизмы, в которых щетки, состоявшие из нескольких медных полос, могли быть чрезвычайно быстро приведены в соприкосновение с медными пластинами. Целый ряд механических приспособлений препятствовал отскакиванию щеток после соприкосновения, обеспечивая четкость движений. Первый рубильник, посредством собачки и рычага, был связан со вторым таким образом, что включение первого рубильника мгновенно влекло за собой включение и второго, т. е. разрядку аккумуляторов через соленоид. Далее, второй рубильник автоматически сразу же прерывал соединение снова, и ток устремлялся в тонкий шунт. От гигантского тока шунт проплавлялся в течение 0,01 *сек*, после чего ток прерывался вовсе. Включение первого и второго рубильников продолжалось $^1/_{40}$ *сек*. Аппарат работал настолько четко, что одновременность включения могла быть обеспечена с точностью до 0,0001 *сек*. Было обращено серьезное внимание на сопротивление рубильников и подводящих кабелей; оно было сделано равным 0,0016 Ω. Таким образом лишь около 7—10% тока терялось в проводке.

Этим методом П. Л. Капице удалось получать поля порядка 500 000 гаусс в соленоиде внутренним сечением около 1 *мм*^{2} в течение 0,003 *сек*. В объеме около 2 *см*^{3} можно было иметь около 80 000 гаусс, что уже представляет собою огромный успех по сравнению с полями, получаемыми в обычных электромагнитах.

Генерирование столь сильных мгновенных полей требовало специальной методики измерения токов, напряжений и самых полей. Измерения производились посредством специальных осциллографов. К этому вопросу мы вернемся ниже.

Как уже говорилось при описании установки Уолла, огромные токи, протекающие через соленоид, вызывают в

нем чрезвычайно большие механические усилия (взаимодействие между витками). Это обстоятельство представляло собою серьезное препятствие. Когда П. Л. Капица в 1925 г. установил у себя еще более мощную установку (см. ниже), соленоиды разлетались вдребезги почти при каждом опыте. Только благодаря крайне остроумной конструкции соленоида наконец удалось преодолеть и это затруднение. К описанию соленоида мы также еще вернемся.

Сейчас же мы перейдем к другому методу создания сильных полей, также осуществленному П. Л. Капицей, — методу короткого замыкания генератора.

Метод короткого замыкания генератора.

Для того, чтобы создать поле порядка 1 000 000 гаусс, необходимо иметь запас энергии в 50—100 раз больший, чем запас энергии описанной выше батареи аккумуляторов, т. е. около 50 000 kW. Кроме того аккумуляторы сравнительно быстро портились. Наконец весьма трудно резко и определенно включить и выключить постоянный ток столь огромной силы.

Гораздо более подходящим источником энергии может служить генератор, замыкаемый в течение малого промежутка времени. Механическая энергия, накапливаемая ротором в момент замыкания, разряжается, ротор тормозится, а в цепи проносится огромный ток. Для того чтобы иметь достаточное количество энергии, генератор должен быть рассчитан на постоянную мощность в 2 000 kW. Для того, чтобы легко включать и прерывать ток, генератор должен быть переменного тока; в таком случае можно осуществлять включение и выключение в моменты, когда кривая тока проходит через нуль.

Очевидно, что для поставленной задачи конструкция генератора должна быть такова, чтобы: 1) кривая тока имела плоский максимум (т. е. ток в течение некоторого промежутка времени постоянен), 2) в момент короткого замыкания возникал очень большой ток, медленно затем спадающий. Обе эти особенности, характерные для специального генератора, могущего служить для создания мгновенных сильных

токов, резко противоречат требованиям, предъявляемым к обычным генераторам. Как раз эти две характерные черты, отличающие данный генератор, считаются дефектами в обычной электротехнике. Эти дефекты должны быть доведены до гипертрофии — такова задача конструктора. Эта задача была разрешена самим П. Л. Капицей (являющимся инженером-электриком по образованию) совместно с инж. М. Костенко, проф. Майльс Вокером и др., и генератор был построен компанией Викерс.

При рациональном расчете удалось значительно уменьшить постоянную мощность машины, доведя мгновенную максимальную мощность при замыкании до 220 000 kW.

Плоский максимум кривой тока достигается вполне определенным соотношением обмоток. Обмотка состоит из двух частей.

Весьма существенна механическая прочность машины, ибо в момент замыкания развиваются гигантские силы. Кроме того кажущееся сопротивление (импеданс) машины должно было быть доведено до минимума. Так как генератор замыкается на соленоид, кажущееся сопротивление которого приблизительно равно кажущемуся сопротивлению обмотки, машина дает лишь 110 000 kW и из них могут быть использованы в соленоиде лишь около 55 000 kW. В момент замыкания скорость ротора уменьшается на 10% и, следовательно, высасывается 20% кинетической энергии. Машина приводится в движение мотором в 80 HP постоянного тока, сидящим на одном валу с ротором генератора.

Чрезвычайно серьезное препятствие встретилось в том, что в момент замыкания возникает сильнейшая упругая волна, потрясающая, несмотря на ряд принятых мер, здание лаборатории. Это затруднение было обойдено с редким остроумием. Соленоид и измерительные приборы отнесены от генератора на расстояние около 20 *м*, куда проложен толстый кабель. Так как самый процесс записи тока и других измерений продолжается, как и самое замыкание, около 0,01 *сек*, упругая волна, идущая по земле со скоростью 2 000—3 000 *м/сек*, не успевает еще дойти до приборов, когда уже опыт кончен, фотографические записи сделаны и т. д. Через несколько

минут замыкание повторяется, но опять волна не успевает помешать опыту. Лаборатория П. Л. Капицы в Кэмбридже помещается в специальном здании. Для того чтобы избежать несчастных случаев, в момент, когда включается генератор, двери лаборатории автоматически закрываются специальными электромагнитными механизмами и зажигаются сигнальные лампы.

Серьезнейшим вопросом здесь, как и в методе разрядки аккумуляторов, является вопрос устройства переключателя и синхронизирующих приспособлений. Практически невозможно включить и выключить ток в точности тогда, когда кривая тока проходит через нуль. Достаточно отступить на 0,0003 *сек* в ту или иную сторону, чтобы уже столкнуться с током в 3 000—6 000 А. Если прервать этот ток без дуги, то накопленная энергия зарядит генератор до высокого потенциала, что может привести к пробою изоляции обмотки. Поэтому необходимо включить в момент выключения тока емкость в 50 μF. Щетки переключателя начинают отдаляться друг от друга несколько ранее срока с тем, чтобы зажглась дуга, которая затем потухает через 0,0005 *сек*, не причиняя вреда. Далее продолжается слабый колебательный разряд.

Переключатель должен работать с точностью до 0,0003 *сек* по отношению к нулевому моменту. Для того чтобы развести щетки, весящие 1 *кг*, на расстояние 0,5 *мм*, в течение не более 0,0003 *сек*, им нужно сообщить ускорение, в 1000 раз превышающее ускорение силы тяжести, т. е. сила должна быть приложена порядка 1 *т*. Уже эти несколько соображений показывают, какие затруднения были преодолены при конструктировании переключателя. Да и само изготовление его из специальной стали требует исключительной тщательности. Мы не будем входить в рассмотрение деталей этого шедевра. Интересно отметить еще одно затруднение: небольшое нагревание соленоида меняет его сопротивление, а значит и режим тока, и синхронизация может быть нарушена.

Момент включения и выключения тока связан во времени с целым рядом манипуляций, как то: пуском падающих пла-

стинок осциллографов и включением целого ряда предохранительных реле. Все это работает безукоризненно.

Теперь обратимся к методу измерения токов и полей.

Измерение токов и полей.

П. Л. Капицей был применен обычный тип дудделевского осциллографа для измерения как силы тока, так и напряжения. Сила тока измерялась шунтированным осциллографом. Для измерения напряжения служил другой осциллограф, в цепь которого было включено добавочное сопротивление в 300 Ω.

Осциллографы, однако, пришлось сконструктировать заново для того, чтобы они соответствовали требованиям установки.

Этих требований было два: во-первых, сила тока в осциллографе должна была меняться так же, как и в соленоиде, и, во-вторых, осциллограф должен был отмечать крайне быстрые изменения, т. е. должен был быть построен на частоту 20 000—30 000 кол./*сек*.

Условие, удовлетворяющее первому требованию, вытекает из уравнения:

$$ir + l\frac{di}{dt} = JR + L\frac{dJ}{dt},$$

где i — сила тока в осциллографе, J — сила тока в соленоиде, r — сопротивление осциллографа, R — сопротивление соленоида, l — самоиндукция осциллографа, L — самоиндукция и t — время.

Если теперь:

$$\frac{r}{l} = \frac{R}{L},$$

то оказывается

$$i = \frac{R}{r} J,$$

т. е. ток в осциллографе пропорционален току в соленоиде. Это условие, как уже указывалось выше, отнюдь не было соблюдено Уоллом в его установке, и величина его поля поэтому неизвестна.

Второе требование удовлетворяется, как показывает теория, уменьшением длины нити осциллографа. П. Л. Капицей был сконструирован соответствующий миниатюрный осциллограф. Шунт, включаемый в цепь осциллографа, был сделан безындуктивным и состоял из толстых проволок.

Измерение поля H производилось по току в соленоиде. До опыта определялась константа X соленоида, т. е. на полях меньшей силы выяснялась зависимость

$$H = \varkappa J,$$

а затем, зная J, можно было всегда найти H.

Впоследствии был применен метод непосредственного баллистического измерения полей. Внутри соленоида укреплена специальная катушечка, соединенная с баллистическим гальванометром. Совершенно очевидно однако, что если гальванометр будет приключен все время, пока ток возрастает и падает, то никакого показания прибор не даст. Поэтому был устроен специальный автоматический переключатель, приключавший гальванометр в любой момент и одновременно дававший световую метку на осциллограмме силы тока. Большие трудности при этом представляла собою необходимость тщательной бифилярной проводки от катушки к гальванометру.

Обратимся теперь к устройству самого соленоида.

Устройство соленоида.

Соленоид, по которому проходит ток, подвергается действию сил различных направлений: во-первых — это силы радиальные, пытающиеся разорвать каждый виток, и, во-вторых — это силы осевые, прижимающие один виток к соседнему. Мы не будем здесь останавливаться на анализе этих сил, достигающих 1 тонн/*см*², который был детально произведен П. Л. Капицей.

Основой соленоида служит цилиндр из сплава меди с 2 % кадмия (этот сплав обладает электропроводностью, равной 90% электропроводности меди, и, будучи закален, в четыре раза превосходит прочностью медь). Этот цилиндр обматывается

лентой в 5 *мм* шириной из того же сплава, изолированной клеенкой и слюдой. Внутренний конец обмотки припаивается к цилиндру, наружный несет на себе скользящий контакт. Контакт должен быть сделан скользящим, ибо вследствие огромных магнитных радиальных сил соленоид слегка разматывается при прохождении по нему тока. Как ни странным кажется на первый взгляд устройство скользящего контакта при 30 000 А, но кратковременность прохождения тока делает его безвредным. Соленоид пропитывается бакелитом, заполняющим все полости, а затем заключается в прочный стальной (специальной стали) бандаж. При поле в 400 000 гаусс бандаж испытывает давление в 100 тонн. Присутствие стали, как показали опыты при полях внутри соленоида бóльших 40 000 гаусс, не играет уже никакой роли, ибо тогда поле вне соленоида достаточно велико, чтобы довести сталь до насыщения.

Этот соленоид выдерживает пока с успехом 329 000 гаусс,— наибольшее поле, до которого практически пока доходит П. Л. Капица в своих исследованиях.

Физические явления в сильных магнитных полях.

Сейчас еще рано говорить о результатах исследований П. Л. Капицы, ибо они едва лишь начались. Надо заметить, что кратковременность существования сильных полей требует совершенно особой методики эксперимента, отличной от общепринятой. И эта методика пока лишь в стадии разработки. Прежде всего П. Л. Капица попытался измерить эффект Зеемана при этих полях в спектрах различных веществ. Оказалось, что удается наблюдать явление Пашена-Бака в тех спектрах, где его до сих пор, ввиду слабости наших обычных полей, наблюдать не удавалось. Самое расщепление было так велико, что его можно было исследовать простым спектроскопом.

Недавно П. Л. Капица опубликовал исследование влияния магнитного поля на электропроводность висмута. Оказалось, что в столь сильных полях самая форма зависимости

изменения сопротивления от величины поля меняется; вместо открытого когда-то Гольдгаммером квадратичного закона, имеющего место в слабых полях, обнаруживается линейный закон. Ко всем этим вопросам мы еще как-нибудь вернемся.

Уже опубликованные работы П. Л. Капицы во всяком случае показывают, что область сильных магнитных полей, как и области низких температур, высоких давлений и высоких напряжений, есть область не только количественно, но и качественно новых явлений: в этом их главный интерес.

Литература.

П. Л. Капица (P. Kapitza). Proceedings of the Royal Society, A, *105*, 691, 1924; *106*, 602, 1924; *109*, 227, 1925; *115*, 658, 1927.

Уолл (Wall). Applied Magnetism, 1926.