

Л. Аикинази

## Как получают сильные постоянные магнитные поля

Магнитные поля применяются практически во всех областях физики, в том числе для исследования свойств веществ, для получения сверхнизких температур, в экспериментах с элементарными частицами. Магнитные поля необходимы для работы установок тероядерного синтеза и МГД-генераторов — новых методов получения энергии, которые в ближайшем будущем, возможно, станут энергетической базой нашей цивилизации.

Каковы, с точки зрения этих применений, важнейшие характеристики магнитных полей и методов их получения? Прежде всего, это величина индукции магнитного поля. Для применений, связанных с энергетикой, обычно должна быть достигнута вполне определенная и довольно большая величина индукции — порядка 10 Тл, иначе соответствующая установка не будет работать или будет иметь очень маленький КПД. Для применений, связанных с исследованием свойств вещества, желательнее получение возможно больших полей — ведь чем шире диапазон изменения любой величины, тем больше шансов найти нечто новое. Для исследований элементарных частиц обычно нужны величины полей того же порядка, что и для энергетики.

Вторая важнейшая характеристика — объем пространства, в котором получается поле. Тут цель одна — чем больше, тем лучше. В энер-

гетических установках увеличение объема, в котором создается сильное поле, увеличивает КПД. В этой области «интересные» объемы 1÷100 м³. Чем больше объем, занимаемый сильным полем, тем выше точность и чувствительность измерений в исследовательских установках. Если искомые события наблюдаются не часто, как, например, пролет редкой космической частицы через пузырьковую камеру, расширяет объем магнитного поля увеличивает вероятность наблюдения события. Для исследования элементарных частиц желательнее создание полей в объемах 1÷10 м³. При исследованиях свойств вещества, когда стремятся получить максимально возможные поля, приходится довольствоваться куда более скромными объемами — порядка 1÷10³ см³.

Кроме того, существенны постоянство индукции поля в пределах какого-то объема (однородность) и постоянство индукции поля во времени (стабильность). Однако эти вопросы не являются обычно «экзотическими». Для энергетических применений еще важно, какая мощность нужна для создания искомого поля, так как эта мощность «вычитается» из мощности, вырабатываемой установкой, и тем самым уменьшает ее КПД.

И все же основными параметрами, зачастую определяющими результаты, полученные в различных областях применения, являются индукция поля и объем пространства, в котором оно создано.

Как же получают сильные магнитные поля?

### Основной всех методов получения сильных постоянных магнитных полей являются большие токи

Из эксперимента известно, что индукция  $B$  магнитного поля, возникающего вокруг проводника с током  $I$ , пропорциональна току и магнитной проницаемости среды  $\mu$  и зависит от формы проводников и расстояния до них  $r$ . В частности, для прямого провода бесконечной длины

Во-первых, на элемент провода длиной  $dl$  с током  $I$ , находящийся в поле с индукцией  $B$ , действует сила  $F$ , равная по модулю

$$F = B I dl \sin \alpha, \quad (1)$$

где  $\alpha$  — угол между вектором  $\vec{B}$  и направлением тока. Следовательно, на провод с током будут действовать силы, пропорциональные силе тока и индукции поля, создаваемого всем соленоидом. Эти силы будут увеличиваться с увеличением поля и размеров области, в которой его надо получить.

Во-вторых, при протекании тока  $I$  по проводнику с сопротивлением  $R$  выделяется мощность

$$P = I^2 R. \quad (2)$$

Эта мощность пропорциональна  $I^2$ , и, следовательно, она будет увеличиваться с увеличением индукции создаваемого поля. Расширение области, в которой получают поле, также будет сопровождаться увеличением выделяющейся мощности.

Таким образом, при попытках создать большие магнитные поля следует ожидать двух неприятностей: соленоиды будут разваливаться и расплавляться. И основные проблемы, стоящие на пути получения сильных магнитных полей, — это проблема прочности и проблема теплоотвода. Как же решаются эти проблемы?

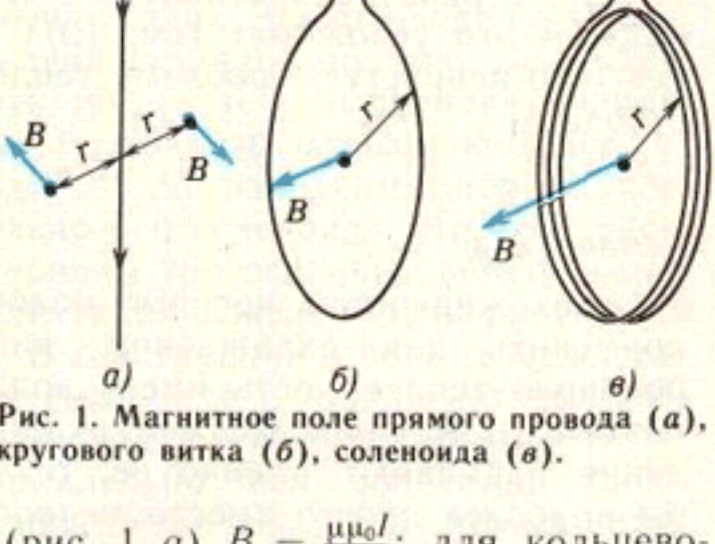


Рис. 1. Магнитное поле прямого провода (а), кругового витка (б), соленоида (в).

(рис. 1, а)  $B = \frac{\mu_0 I}{2\pi r}$ ; для кольцевого витка (рис. 1, б)  $B = \frac{\mu_0 I}{2r}$ , то есть в  $\pi$  раз больше. Поэтому для получения сильных полей применяют кольцевые витки, а точнее — соленоид из кольцевых витков, так как поля отдельных витков суммируются (рис. 1, в).

Будем считать, что  $\mu = 1$ . Катушки на ферромагнитных сердечниках ( $\mu \gg 1$ ) мы не рассматриваем, так как из-за насыщения ферромагнетиков такие катушки не применяют для получения сильных полей.

Итак, чем больше поле и чем больше объем, в котором надо его получить, тем больший для этого потребуется ток. Однако, когда с помощью тока создают магнитное поле, имеют место два «побочных» эффекта, которые и определяют эффективность получения больших полей.

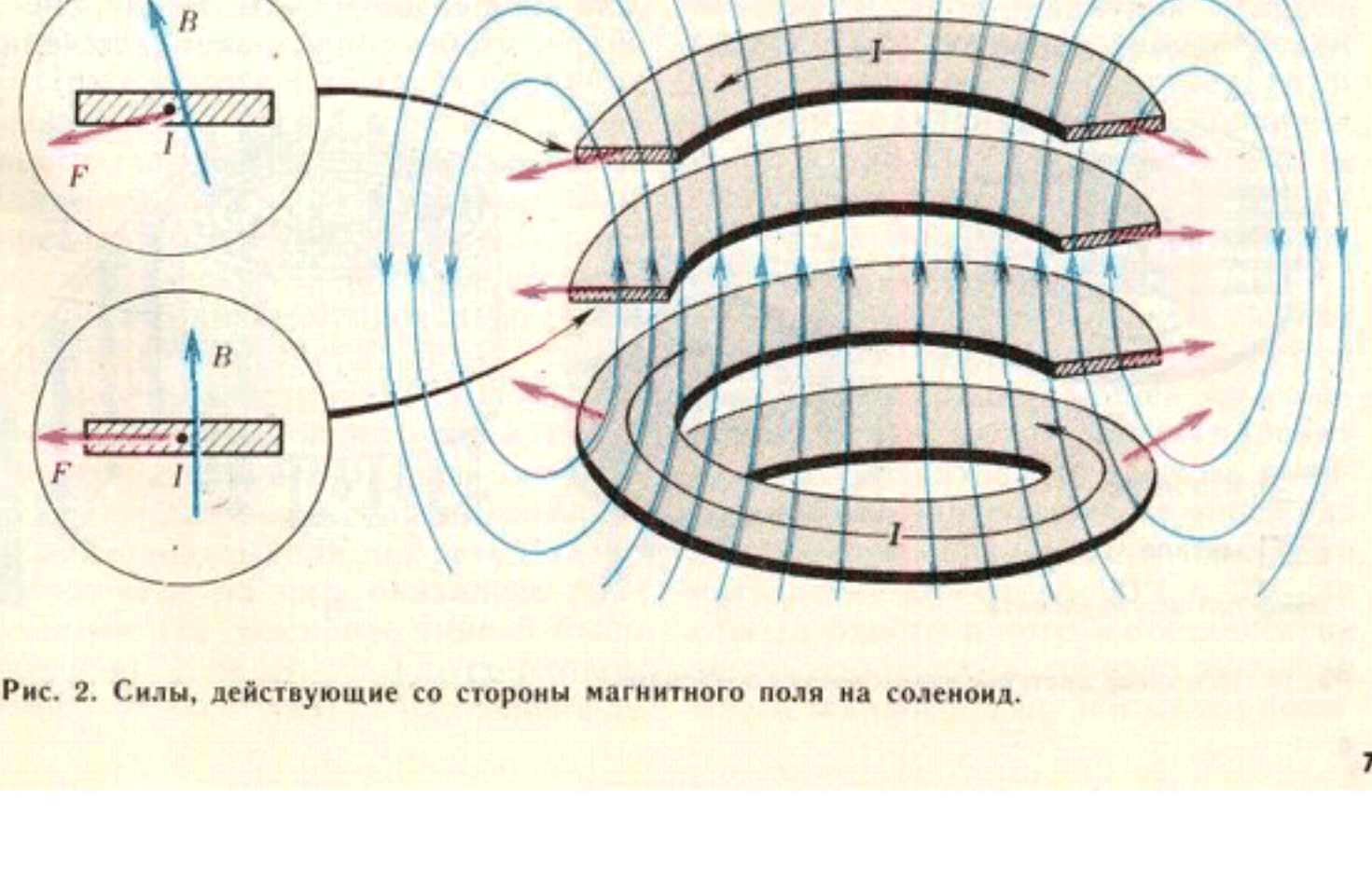


Рис. 2. Силы, действующие со стороны магнитного поля на соленоид.

### Проблема прочности

На рисунке 2 показан соленоид, витки которого сделаны из металлической ленты (скоро мы узнаем, почему их делают именно из ленты, а не из провода круглого сечения). Силы, действующие со стороны магнитного поля, стремятся разорвать соленоид в плоскости витков и, кроме того, прижимают крайние витки к средним. Для борьбы с разрывающими силами соленоид помещают в прочную наружную оболочку, которая и воспринимает разрывающие усилия. Для борьбы со сжимающими силами между витками прокладывают изоляцию, имеющую высокую прочность на сжатие, например слюду или керамику. Но и прочность изоляции, и прочность оболочки не беспредельны. Другой путь борьбы — так называемые «малосильные» соленоиды. Витки в таких соленоидах располагаются так, чтобы угол между вектором  $\vec{B}$  и направлением тока был по возможности меньше — тогда силы уменьшаются (см. (1)). Однако сделать совсем «бессильной» соленоид не удастся.

Силы, действующие со стороны магнитного поля, ограничивают возможные величины индукции поля. Так, в объеме  $\sim 100$  см³ практически нельзя получить поле больше 20 Тл с использованием медного соленоида. Если обмотка сделана из медных сплавов повышенной прочности (медь + цирконий, медь + кадмий и др.), индукция поля в объеме 100 см³ может достигать 40 Тл. Однако

ко сплавы меди имеют большее (в 1,5—2 раза) сопротивление, чем медь. А это усложняет (см. (2)) и без того непростую проблему теплоотвода.

### Теплоотвод

Из всех жидкостей, которые можно применить для охлаждения, наименьшую теплоемкость имеет вода; поэтому, как правило, для охлаждения применяют именно ее. Было бы наиболее просто вместо медного провода намотать соленоид медной трубкой и пропускать внутри трубки воду для охлаждения, а по самой трубке — ток. Так и делали когда-то; так делают и сейчас, но только в тех случаях, когда тепло, которое нужно отвести от соленоида, невелико. Длинная и тонкая трубка создает большое сопротивление текущей воде, и прокачать через такой соленоид большое количество воды не удастся.

Между тем, чтобы отвести от соленоида тепловую мощность, скажем, 5 МВт с помощью воды из водопроводной магистрали (температура воды 10÷15°C), надо прокачивать сквозь соленоид 1000 л воды в минуту, и эта вода будет выходить из соленоида нагретой почти до кипения. Поток воды не должен ни на мгновение ослабевать — иначе температура воды дойдет до 100°C, вода закипит, теплоотвод ухудшится (теплопроводность пара мала) и соленоид разрушится. Поэтому путь для воды должен быть короче и шире, чтобы сопротивление течению

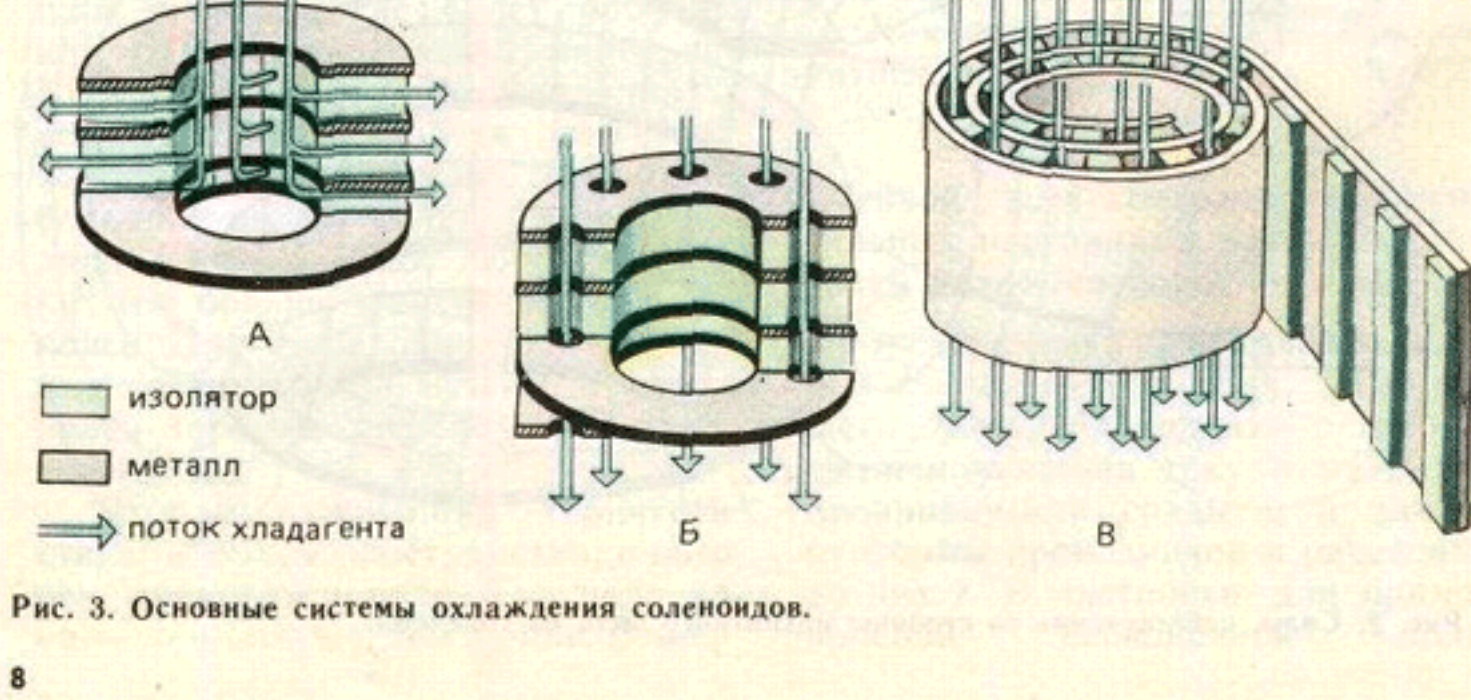


Рис. 3. Основные системы охлаждения соленоидов.

воды было мало, а поток ее соответственно велик. Значит, вода не должна течь параллельно току. Не заставить ли их течь перпендикулярно? Вот будет течь по окружностям, а ток — по радиусам либо параллельно оси соленоида. На этой идее основаны три основные конструкции соленоидов, показанные на рисунке 3.

В конструкции А вода течет вдоль оси соленоида и между витками, по радиусам; в конструкциях Б и В — параллельно оси соленоида либо сквозь витки (Б), либо между ними (В). (Конструкция В выглядит непривычно; чтобы вы лучше ее себе представили, соленоид нарисован «незаконченным» — последний виток еще не намотан.)

Мы уже говорили, что обмотку соленоида делают из медной ленты, а не из обычного, круглого в сечении, провода. Делается это для более эффективного охлаждения. Ведь тепло отводится с поверхности проводника, и чем больше площадь поверхности, тем лучше теплоотвод. С точки зрения охлаждения ленту следует делать как можно тоньше. Однако очень тонкой она быть не может — такой соленоид сложен в изготовлении и слишком велико будет его сопротивление (вспомните, что  $R \sim \frac{l}{S}$ , где  $S$  — площадь сечения проводника). Для более эффективного охлаждения желательно было бы сделать как можно больше отверстий для протекания воды. Но это привело бы к уменьшению прочности соленоида, к увеличению его сопротивления.

При изготовлении соленоида учитываются все «за» и «против» и создается оптимальная конструкция. Получаемые на таком соленоиде поля определяются прочностью материала, его электро- и теплопроводностью, а также тем, насколько точно произведены расчеты оптимальных параметров конструкции.

Размеры трех конструкций, показанных на рисунке 3, были оптимизированы для получения максимально возможного поля, но результаты, достигнутые на них, оказались различными. На соленоиде типа А было получено поле  $B = 5$  Тл (тепловые потери  $P = 0,6$  МВт); на соленоиде

типа В получено после  $B = 13$  Тл ( $P = 2$  МВт); на соленоиде типа Б автором этой конструкции Ф. Биттером в 1939 году было достигнуто значение индукции  $B = 10$  Тл ( $P = 1$  МВт). В настоящее время на соленоидах типа В получают поля в 30÷40 Тл. (Все данные приведены для соленоидов с внутренним диаметром 3 см.)

### Криогенные соленоиды

Посмотрим еще раз на формулу (2). Выделяющаяся в соленоиде мощность пропорциональна сопротивлению (именно поэтому соленоиды делают из меди). С уменьшением сопротивления соленоида уменьшаются тепловые потери. Один из способов уменьшения сопротивления — охлаждение обмотки с помощью криогенных жидкостей — сжиженных газов. Медный соленоид, охлаждаемый жидким азотом ( $T = 78$  К) или жидким водородом ( $T = 21$  К), уменьшает свое сопротивление в 8 и 100 раз соответственно; во столько же раз уменьшается отводимая мощность.

Сопротивление различных металлов при понижении температуры уменьшается в разной степени, и металл, имеющий при температуре 300 К сопротивление больше, чем у меди, может при низкой температуре быть более электропроводным, чем медь. В частности, при  $T = 21$  К наименьшее среди всех металлов сопротивление имеет алюминий, и оно почти в 10 раз меньше сопротивления меди при этой же температуре. Таким образом, охладив медный соленоид до 78 К или 21 К, можно уменьшить выделение в нем тепла в 8 или 100 раз, а заменив при 21 К медь на алюминий — еще в 10 раз.

В охлаждаемых жидкими газами соленоидах тепло отводится не за счет нагрева протекающей по соленоиду воды, а за счет испарения сжиженных газов. Но теплота испарения сжиженных газов во много раз меньше, чем теплоемкость воды (при нагреве ее от 10 до 90°C). И для отвода одного и того же количества тепла необходима гораздо большая масса жидкого газа, чем масса воды.

Так что у криогенных соленоидов есть важный недостаток — большой расход сравнительно дорогого хладагента.

В результате криогенные соленоиды широкого распространения не получили, тем более что у них появились еще более холодные конкуренты:

### Сверхпроводящие соленоиды

У многих металлов и сплавов при охлаждении до определенной температуры (критической) сопротивление становится равным нулю. В таком состоянии эти металлы и сплавы называют сверхпроводниками. Если сделать из такого материала обмотку соленоида и охладить соленоид до температуры ниже критической, то его сопротивление станет равным нулю. Этим решается проблема теплоотвода — ведь если равно нулю сопротивление, то равна нулю и выделяющаяся мощность. Проблема прочности остается, поэтому «рекордных» полей сверхпроводящие соленоиды не создают. Но зато они легче и меньше по размерам, чем медные водоохлаждаемые. По сравнению с криогенными сверхпроводящие соленоиды требуют в сотни раз меньшего расхода хладагента. (Вообще говоря, сверхпроводящие соленоиды тоже можно было бы назвать криогенными — ведь они охлаждаются теми же жидкими газами, но по традиции криогенными называют только не сверхпроводящие соленоиды).

Казалось бы, с помощью сверхпроводящих соленоидов можно получить громадные поля. Однако это не так — индукция поля в сверхпроводящем соленоиде ограничена некоторым критическим значением  $B_{кр}$ . При этом критическом значении поля исчезает сверхпроводимость. Значения  $B_{кр}$  различны для разных металлов и сплавов. Наиболее широко применяется сейчас в качестве материала сверхпроводящих соленоидов соединение  $Nb_3Sn$ . Для него  $B_{кр} = 30$  Тл (при 4,2 К). Но и такое поле с помощью сверхпроводящего соленоида из  $Nb_3Sn$  получить не удалось. Практически с помощью соленоидов из  $Nb_3Sn$  получают пока поля  $B \leq 20$  Тл.