

ФИЗИКА НАШИХ ДНЕЙ

## СТЕЛЛАРАТОР \*)

*Л. Спитцер*

На первой Международной конференции по вопросам использования атомной энергии для мирных целей, которая состоялась в Женеве три года тому назад, собрались представители 72 наций, чтобы сравнить свои попытки извлечь полезную мощность из энергии, освобождающейся при делении ядер. Однако, когда конференция открылась, реакции деления уступили главное место еще более волнующим вопросам. Президент конференции Хоми Дж. Баба предсказал, что примерно через 20 лет человек сможет получать полезную мощность с помощью термоядерных реакций. Он сообщил, что индийские ученые уже работают над осуществлением этой возможности. Так как подобные реакции, происходящие при слиянии ядер тяжелых изотопов водорода, могут поддерживаться в качестве топлива водой океанов, то технологическое решение этой задачи гарантирует человечеству практически неисчерпаемый источник энергии.

На второй Женевской конференции по атомной энергии реакции синтеза были поставлены в центр внимания. Сложные и зачастую глубокие вопросы, встретившиеся в ходе исследований, заняли значительную часть официальных и неофициальных обсуждений. Тщательно выполненные экспериментальные установки, демонстрировавшиеся Великобританией, США и СССР, свидетельствовали об осуществлении большой программы работ по использованию ядерной энергии, до недавнего времени засекреченных. Среди полных надежды оценок будущего прогресса никто не претендовал на решительное доказательство возможности получения контролируемых термоядерных реакций. С другой стороны, никто не сообщал об открытии каких-либо непреодолимых препятствий.

К числу различных направлений, входящих в общую программу исследований США, и в подробностях, впервые преданных гласности в Женеве, относится «стелларатор», сообщение о котором является темой этой статьи. Эта работа по проекту Маттерхорн в Принстонском университете охватывает результаты, полученные в ходе теоретических и экспериментальных исследований, ведущихся с 1951 г. Перед нами, как и перед другими исследователями, работающими в этой области, стояла двойная задача — создать и затем поддерживать термоядерную реакцию. Когда два ядра тяжелого водорода сталкиваются при высоких энергиях, они взаимодействуют, образуя новое ядро и освобождая или протон, или

\*) *Scient. Amer.* 199, № 4, 28 (1958). Перевод М. Н. Флеровой. В оригинале подзаголовок: «Экспериментальное устройство для исследования термоядерных реакций с использованием «закрученного» магнитного поля для удержания ионизированного газа и электрического поля для его нагрева, о котором было доложено на второй Женевской конференции».

нейтрон, обладающие большой энергией. Чтобы получить от этой реакции полезную мощность, газообразный дейтерий (водород с массой 2) или смесь дейтерия и трития (водорода с массой 3) надо нагреть до огромной температуры — около 100 миллионов градусов абсолютной шкалы. Задача заключается в том, чтобы удержать газ внутри определенной области, предотвратив его соприкосновение с каким-либо твердым телом. Если чрезвычайно сильно нагретый водород соприкоснется с какой-либо твердой

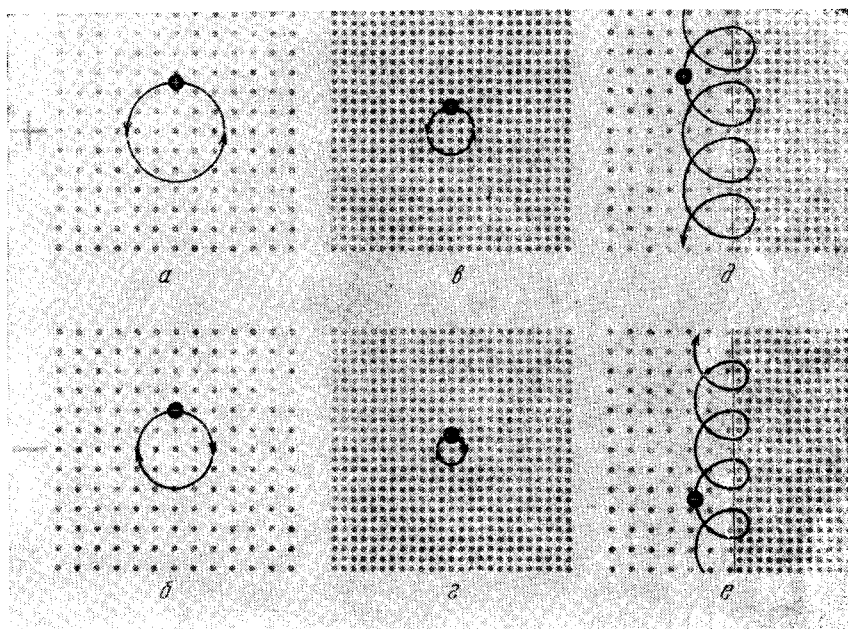


Рис. 1.

Пути заряженных частиц в магнитных полях показаны схематически. Маленькими кружочками изображены сечения силовых линий. В слабом однородном магнитном поле (а и б) положительная частица, например ион дейтерия (а), описывает окружность в одном направлении; отрицательная частица, например электрон (б), описывает окружность в противоположном направлении. (В действительности, для дейтрона диаметр траектории в 60 раз больше, чем для электрона.) В сильном поле (в и г) окружности меньше. В воображаемом поле, резко меняющемся от слабого к сильному (д и е), пути частиц представляют собой незамкнутые кривые, направленные противоположно друг к другу и состоящие из полуокружностей большого и малого радиусов.

поверхностью, по необходимости сравнительно холодной, то температура газа резко упадет, а твердое вещество будет стремиться расплавиться или испариться.

Использование магнитных сил является, по-видимому, единственным способом, с помощью которого можно удержать термоядерную реакцию в определенном объеме. Одна из попыток создания такой «магнитной бутылки» была посвящена так называемому «пинч-эффекту». В этом случае большой электрический ток, проходящий через горячий газ, создает сильное магнитное поле, которое одновременно удерживает и нагревает газ до высокой температуры, сжимая его (см. Р. Пост «Энергия слияния ядер», УФН, т. LXV, вып. 2 (1958)). В проекте Маттерхорн испытывается несколько иной путь. В стеллараторе газ должен удерживаться в магнитном поле, которое создается независимо от электрического тока, используемого для начального нагрева газа до нескольких миллионов градусов. Сверхвысокие температуры мы надеемся получить с помощью эффекта так называемой «магнитной накачки», вызываемого вторым внешним магнитным полем.

быстро пульсирующим во времени. Мы еще не знаем, удастся ли с помощью стелларатора получить контролируемую термоядерную реакцию. На каждом шагу работы мы должны разрешать неожиданно возникающие перед нами задачи, причем каждый раз мы узнаем что-нибудь новое об удивительных свойствах горячего газа в магнитном поле. Нас ожидает еще много таких задач.

Ограничивающее ионизованный газ магнитное поле создается в стеллараторе самым простым методом, а именно путем пропускания сильного

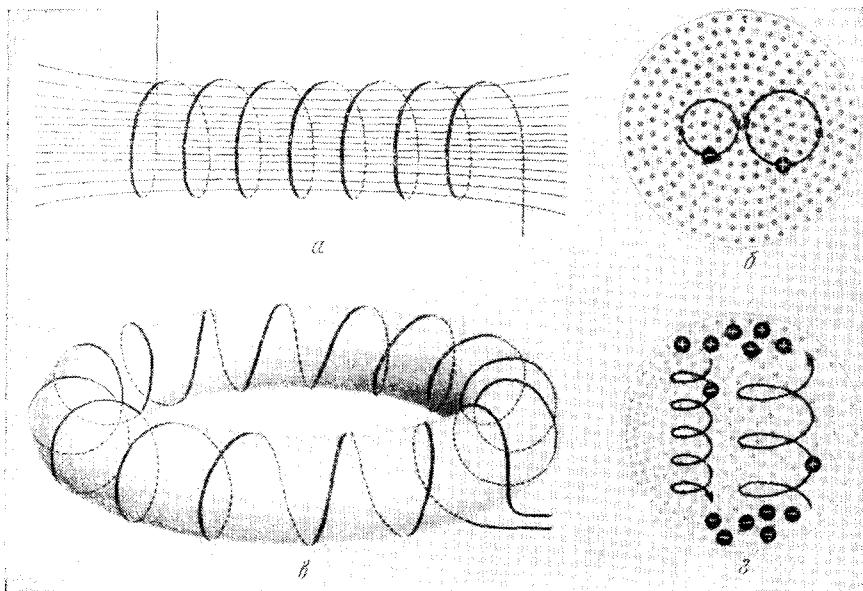


Рис. 2.

Магнитное удержание заряженных частиц может быть достигнуто с помощью однородного поля, подобно тому, которое создается внутри длинной прямой трубки, с намотанной вокруг нее катушкой, по которой проходит электрический ток (а). Частицы будут двигаться в трубке по винтовым траекториям, складывающимся из круговых движений вокруг силовых линий (б) и прямолинейного перемещения вдоль силовых линий. Если концы соединить, согнув трубку в бублик (в), поле уже не будет однородным, оно будет сильнее во внутренней части бублика. В результате положительные и отрицательные частицы разделяются, двигаясь по спиралям кверху и книзу.

электрического тока через соленоид (см. рис. 2, а). В обычной прямой цилиндрической катушке, которая применяется в простых реле, магнитное поле параллельно оси катушки и имеет одинаковую напряженность как вдоль оси, так и в поперечном сечении. «Магнитные силовые линии» — воображаемые линии, параллельные направлению магнитного поля внутри катушки, — являются прямыми. Если мы поместим в такое магнитное поле трубку, содержащую горячий газообразный дейтерий, то поле будет оказывать на него воздействие, так как атомы последнего ионизованы, т. е. лишены своих электронов. Заряженные частицы (положительно заряженные ядра и свободные электроны),двигающиеся поперек магнитного поля, испытывают действие отклоняющей силы и благодаря этому вращаются вокруг силовых линий магнитного поля (рис. 1, а, б, в, г). Так как на движение частиц вдоль силовых линий магнитное поле не оказывает воздействия, то путь каждой частицы будет представлять собой винтовую линию. Газ, удерживаемый таким образом магнитным полем, не будет касаться стенок трубки (рис. 2, б). Этим способом можно было бы

создать «идеальную магнитную бутылку» для термоядерных реакций, если бы у катушки не было концов, откуда выходят силовые линии магнитного поля и где газ должен прийти в соприкосновение с твердыми стенками.

Этого можно избежать самым простым путем, если согнуть катушку по кругу и соединить ее концы вместе, чтобы образовалась замкнутая трубка, не имеющая концов. В такой тороидальной (имеющей форму бублика) катушке (рис. 2, *в*) силовые линии будут иметь вид окружностей. К сожалению, такая круговая катушка имеет один роковой недостаток, благодаря которому ее нельзя рассматривать как удовлетворительную магнитную бутылку. Вследствие кривизны напряжение магнитного поля вблизи внутренней стенки трубки больше, чем вблизи внешней. Такая неоднородность поля искажает винтообразный путь заряженных частиц. Вблизи внутренней стенки относительно более сильное поле резче искривляет путь частицы, чем вблизи внешней. В результате этого происходит «дрейф» заряженных частиц в поле (рис. 1, *д* и *е*). Положительно заряженные ядра собираются в верхней части трубки, а электроны — в нижней части (рис. 2, *з*).

Этот дрейф плох сам по себе, однако его косвенное действие приводит прямо-таки к катастрофическим последствиям. Происходящее вследствие дрейфа разделение электрических зарядов приводит к возникновению большого электрического поля, которое совершенно искажает пути частиц, вследствие чего весь газ ударяется о стенки трубки. Если бы электрические заряды могли бы перетекать обратно вдоль силовых линий поля, то эта катастрофа могла бы быть предотвращена, но в полностью ионизованном газе это невозможно. В этом проявляется замечательный факт, который состоит в том, что постоянное электрическое поле, приложенное перпендикулярно магнитному полю, не создает никакого тока в полностью ионизованном газе, но заставляет частицы газа двигаться по направлению, перпендикулярному как к электрическому, так и к магнитному полю. Постоянное электрическое поле, приложенное вдоль магнитного поля, легко создает электрический ток, параллельный силовым линиям. Однако это не улучшает положения дел в случае простого тора, так как силовые линии не связывают области, в которых находятся электрические заряды противоположного знака.

Имеется, однако, простое средство, чтобы избежать катастрофического дрейфа заряженных частиц через тороидальное магнитное поле. С помощью того или иного метода мы можем перекрутить магнитное поле вокруг его круговой оси (называемой «магнитной осью») и получить силовые линии винтообразной формы, подобно виткам веревки. При этом силовая линия магнитного поля совершает бесконечное число последовательных оборотов вокруг тора и последовательных перекручиваний вокруг магнитной оси, вычерчивая таким образом целую поверхность, называемую «магнитной поверхностью» (рис. 3, *а*). Силовые линии вблизи магнитной оси образуют магнитные поверхности, которые как бы вставлены внутрь поверхностей, создаваемых силовыми линиями, проходящими снаружи. Это семейство магнитных поверхностей образует магнитную бутылку, которая может удерживать сверхгорячий газ в стеллараторе.

В таком закрученном тороидальном поле влияние дрейфа частиц значительно снижено. Большинство частиц быстро движется вдоль перекрученных силовых линий, вращаясь благодаря этому вокруг магнитной оси. Когдадвигающиеся вверх частицы находятся выше магнитной оси, они, разумеется, стремятся удалиться от нее; однако, когда они находятся ниже, то тот же самый дрейф по направлению вверх компенсирует это удаление, вновь приближая частицы к оси (рис. 3, *б* и *в*). В результате этого

среднее расстояние частиц от магнитной оси не меняется. Противоположно заряженные частицы все еще проявляют тенденцию расходиться в разные стороны, что сопровождается разделением зарядов. Но теперь заряды могут стекать обратно вдоль силовых линий, так как отдельная линия, если следовать вдоль нее на протяжении некоторого пути, проходит от верхней части трубки к нижней. Всякое различие в электрических зарядах вдоль силовой линии, таким образом, устраняется, благодаря чему становится возможной постоянная изоляция ионизованного газа.

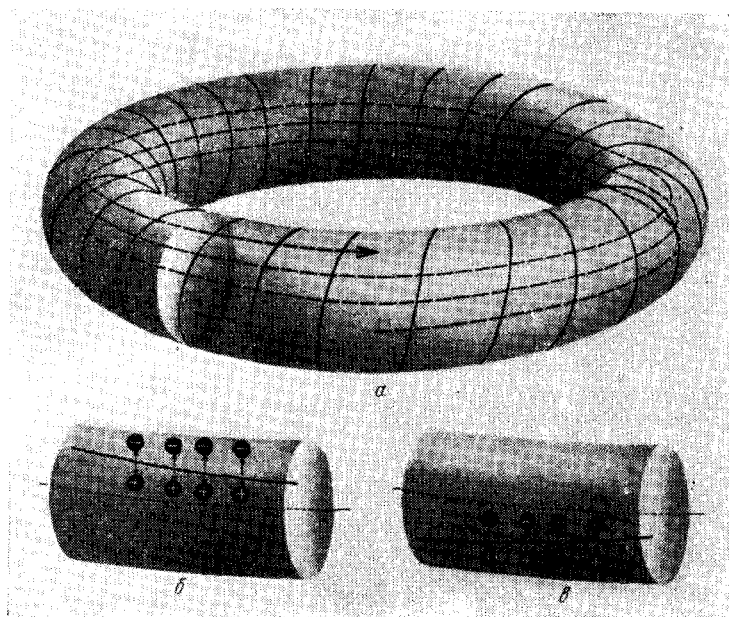


Рис. 3.

Закрученное магнитное поле противодействует стремлению зарядов разъединиться. На рисунке (а) показан участок одной силовой линии, которая, если ее продолжить на всю ее длину, даст поверхность кольцевой формы. Каждая линия лежит выше оси в некоторых частях трубки (б) и ниже оси в других частях трубки (в). Таким образом, положительные и отрицательные заряды движутся в некоторых точках от центральной линии, а в других точках — по направлению к центральной линии.

Необходимое закручивание может быть наложено на тороидальное поле различными способами. Этого можно достигнуть, пропуская электрический ток вдоль магнитных силовых линий в торе, но такой ток нельзя поддерживать постоянным, и он будет пульсировать каждые несколько секунд. Так как желательно иметь возможность управлять термоядерным реактором непрерывно, без пульсаций, предпочтительнее применять другой метод закручивания силовых линий. Оказывается, что придавая простому тору форму восьмерки, можно получить значительное закручивание силовых линий; большая часть экспериментальных работ проекта Маттерхорн проводилась с магнитными полями, имеющими форму восьмерки (рис. 4). В настоящее время мы занимаемся разработкой более перспективного метода, при котором тороидальное поле закручивается в результате взаимодействия с дополнительным поперечным магнитным полем. Это магнитное поле создается рядом витков, по которым ток течет в противоположных направлениях в соседних участках обмотки. При возникающем в такой системе закручивании поля угол закручивания

возрастает как квадрат расстояния от магнитной оси; такая разница в угле закручивания между внешними и внутренними магнитными поверхностями помогает стабилизировать газ.

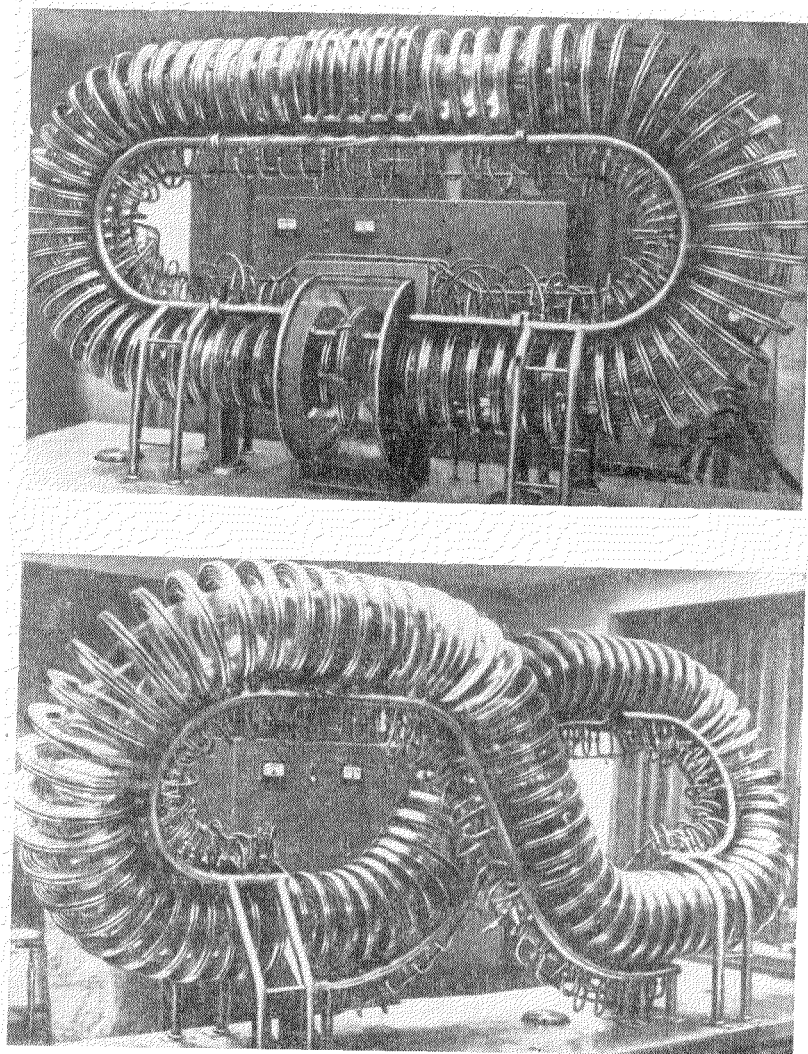


Рис. 4.

Грубки стелларатора в проекте Маттерхори (Принстонский университет) имеют закрученное магнитное поле, предназначенное для того, чтобы помешать ограничиваемому им газу ударяться о стенки камеры. В установке, изображенной наверху, закручивание производится катушками с винтовой намоткой, которые можно видеть между секциями основной катушки, создающей магнитное поле. Показанная внизу установка с трубкой, имеющей форму восьмерки, также производит закручивание.

Теперь мы можем считать, что магнитная бутылка стелларатора более или менее готова для изоляции горячего газа, и можем вернуться к вопросу о нагревании газа до высоких температур. Предварительная фаза нагревания производится в стеллараторе довольно просто — путем пропускания через газ сильного электрического тока. Железный трансформаторный сердечник, охватывающий тороидальную трубку,

и первичная обмотка, намотанная на железо, дают нам обычный трансформатор, в котором вторичной обмоткой служит газ (рис. 5). Когда в первичной обмотке прилагается напряжение, то через газ вдоль магнитных поверхностей протекает электрический ток. Мощность, теряемая на сопротивлении газа, идет на ионизацию и нагревание газа, а также на возбуждение ультрафиолетового и видимого излучения. Это нагревание называется «омическим», так как именно омическое сопротивление газа создает при прохождении тока тепло. В отличие от тока пинч-эффекта, ток омического нагревания не производит сжатия или уплотнения ионизованного

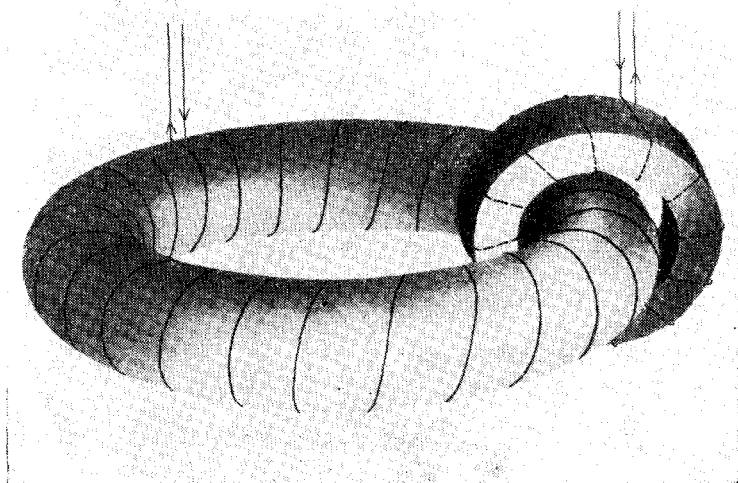


Рис. 5.

Газ в стеллараторе нагревается индукционным путем примерно до одного миллиона градусов. Ток первичной обмотки железного сердечника (справа) индуцирует вторичный ток в газе трубки. Так же, как и в обычном металлическом проводнике, ток, проходя через газ, нагревает его. По мере того, как газ становится горячее, его сопротивление падает; это происходит до тех пор, пока дальнейшее нагревание становится невозможным.

газа; сильное магнитное поле стелларатора прочно удерживает газ на месте, сохраняя его объем постоянным.

В опытах с полдюжиной небольших стеллараторов (модель В), с трубками от 5 до 10 см в диаметре и от 3 до 6 м аксиальной длиной, были получены многочисленные данные относительно омического нагревания. В этих установках применялись изолирующие магнитные поля от 20 000 до 40 000 гаусс. Так как мощность, потребляемая при максимальном значении поля, была примерно 50 000 *квт*, длительность операций приходилось ограничивать импульсами, продолжающимися 0,02 сек. В течение этих коротких промежутков времени мы могли создавать импульсные разряды для омического нагревания длительностью в несколько тысячных долей секунды. Наблюдаемые в этих экспериментах температуры от 100 000 до миллиона градусов показывают, в соответствии с ожиданиями, что омическое нагревание является эффективным средством ионизации газа в стеллараторе и нагревания его до высоких температур.

В начале выполнения этой программы мы надеялись, что во время омического нагревания газ будет оставаться устойчивым и неподвижным и что такое нагревание приведет нас, таким образом, к цели без особых затруднений. Эксперименты показали, что эта надежда столь же

обоснована, как и надежда на то, что вода, быстро текущая через широкую трубку, будет течь по прямой линии без завихрений. В действительности течение воды при этих условиях будет турбулентным, с беспорядочно движущимися вдоль потока вихрями. Газ, находящийся в процессе омического нагревания, также проявляет бурную активность. Однако электрические силы и магнитные силы вызывают осложнения, делающие поведение газа совершенно отличным от обычной турбулентности. Вследствие дальнедействующих электрических сил между электронами и «голыми» ядрами, частицы, находящиеся на значительных расстояниях друг от друга, могут вести себя коллективно в широком диапазоне явлений. Такая «коллективная активность» в горячем газе ведет к возникновению многих эффектов. Не все они носят разрушительный характер; так, например, возникновение радиошумовых всплесков, подобных тем, которые наблюдаются у Солнца, по-видимому, не влияет на работу термоядерного реактора. Однако некоторые виды коллективных явлений могут приводить к очень серьезным последствиям. Они могут вызывать движение отдельных частиц поперек силовых линий, ухудшая качество изоляции магнитным полем и выплескивая часть горячего газа на стенку трубки. При возмущениях так называемого «гидромагнитного» (или «магнитогидродинамического») типа сами магнитные силовые линии очень сильно искажаются, благодаря чему также происходит выбрасывание газа на стенку. Тенденция к такому гидромагнитному возмущению должна быть много меньше в стеллараторах, в которых магнитное поле перекручено поперечными спиральными полями. Из теории следует, что силовые линии не могут двигаться так легко в случае, когда угол закручивания резко возрастает с расстоянием от магнитной оси.

За другую разновидность нежелательных коллективных явлений, по-видимому, ответственны «убегающие» электроны. Одним из характерных свойств пониженого газа является то, что вероятность столкновения между электроном и другой частицей быстро падает с увеличением скорости. Таким образом, электрон, разогнанный до достаточно большой скорости, практически не будет участвовать в столкновениях и будет продолжать ускоряться полем. Говорят, что такие электроны «убегают»; они не могут больше удерживаться полем и ударяются о стенку, вызывая интенсивное рентгеновское излучение. Когда число убегающих электронов велико, в газе возникают сильные паразитные электрические поля и ток резко падает.

Между прочим, наблюдения над убегающими электронами оказались превосходной демонстрацией эффективности магнитной бутылки стелларатора. При некоторых условиях быстрые электроны будут двигаться вдоль стелларатора еще долгое время после прекращения импульса омического нагревания и ударятся, наконец, о стенку только тогда, когда будет снято магнитное поле. В течение этого времени они пройдут несколько тысяч километров, обернутся вдоль стелларатора около миллиона раз.

Наиболее важный тип коллективных явлений остается еще совершенно непонятным. В некоторых случаях, когда газ не проявляет признаков особой неустойчивости, ионы и электроны постепенно исчезают из разряда, по-видимому, ударяясь о стенки. Это исчезновение газа, называемое «откачкой», представляет собой серьезную утечку в магнитной бутылке. Когда омическое нагревание кончается, утечка как будто останавливается, как это следует из долгого существования убегающих электронов. Причина этой утечки в настоящее время выясняется.

Утечка не носила бы серьезного характера, если бы частица, ударяясь о стенку, просто оставалась бы там. Тогда по крайней мере газ, находящийся в магнитной бутылке, оставался бы горячим. К сожалению, ион,



попадающий на стенку, стремится выбить из нее атомы различных элементов. Эти последние попадают в нагретый газ и охлаждают его отчасти потому, что они сами по себе холодные, отчасти же потому, что они интенсивно излучают энергию. Контролируемый термоядерный реактор принципиально возможен только потому, что водород при высоких температурах излучает очень мало энергии и может поэтому поддерживаться в сильно нагретом состоянии. Атомы более тяжелых элементов не обладают этим удобным свойством и излучают энергию гораздо сильнее вследствие их более высокого ядерного заряда. Таким образом, присутствие любого заметного количества кислорода или железа в разряде делает очень затруднительным поддержание термоядерных температур.

Понизить влияние примесей от стенки можно, по всей вероятности, двумя методами. Основными примесями являются углерод, кислород и азот, которые поглощаются стальными стенками стелларатора и выходят из них во время разряда в результате бомбардировки. Чтобы уменьшить количество этих газов, трубки стелларатора прокаливаются при температуре  $450^\circ$  примерно 12 часов, при постоянной откачке. Это понижает влияние примесей в течение омического нагревания примерно в сто раз по сравнению с непрогретыми трубками. Прокаливание сосуда имеет дополнительное преимущество, а именно оно позволяет снизить начальное давление газа, в котором будет происходить разряд, до  $4 \cdot 10^{-13}$  атмосферы, т. е. примерно до одной тысячной доли того давления, которое получается при обычной технике. Чтобы понизить влияние примесей, образующихся во время работы, большая часть будущих стеллараторов будет снабжена так называемыми диверторами. В диверторе внешний слой магнитных силовых линий отклоняется от оси поля (рис. 6). Заряженные частицы, двигающиеся вдоль этих силовых линий и, следовательно, стремящиеся диффундировать к стенке, перед попаданием на стенку увлекаются в отдельную камеру дивертора. Примеси, получающиеся в диверторе, удаляются вакуумными насосами. Использование дивертора в непрокаливаемой предварительно системе уменьшает уровень примесей примерно до одной пятой его первоначального значения. В прокаленной установке больших размеров применение дивертора может свести влияние примесей практически к нулю.

Независимо от проблем коллективной активности, опыт показывает, что омическое нагревание становится все менее и менее эффективным по мере того, как температура газа начинает превышать миллион градусов. Сопротивление ионизованного газа резко уменьшается при повышении температуры. Поскольку мощность, выделяемая электрическим током, зависит от сопротивления, она также падает с температурой. Для нагревания газа выше миллиона градусов нужно искать другие методы.

В проекте Маттерхорн мы собираемся нагревать газ до температуры, соответствующей началу интенсивных термоядерных реакций, с помощью «магнитной накачки», т. е. быстрой пульсации продольного магнитного поля в короткой секции стелларатора. Эта пульсация производится осциллирующим током в специальной катушке, окружающей нагреваемую секцию внутри тех катушек, которые создают постоянное магнитное поле (рис. 7). Так как напряженность поля растет в течение импульса, то силовые линии сближаются и заряженные частицы, двигающиеся вдоль этих силовых линий, сближаются тоже. Газ при этом сжимается и вследствие сжатия нагревается. Детали этого процесса очень сложны, но действие, которое он оказывает на температуру газа, то же, что и при нагревании обычного газа путем сжатия. Следовательно, мы можем рассматривать движущиеся магнитные силовые линии как поршень, который сжимает и расширяет ионизованный газ.

Хотя газ нагревается при сжатии, но он также и охлаждается при расширении. Поэтому непосредственно не очевидно, почему должно все же иметь место нагревание газа. Действительно, чтобы достигнуть нагревания, необходимо так подобрать частоту пульсации, чтобы она была близка

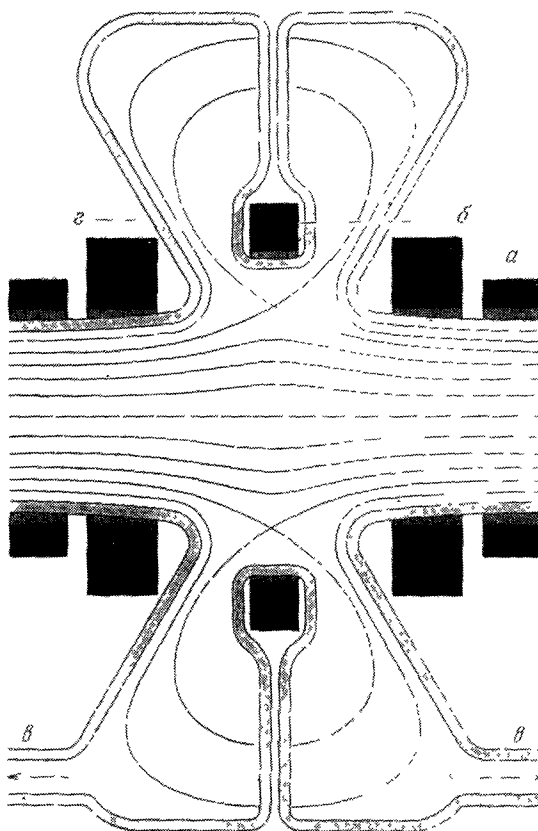


Рис. 6.

Д и в е р т о р помогает устранить попадание частиц газа на стенки трубки. Магнитные силовые линии вблизи стенок отклоняются в боковую камеру, окружающую некоторый участок трубки. Частицы,двигающиеся вдоль этих силовых линий, выходят в камеру и откачиваются из системы. Этот рисунок представляет собой поперечное сечение дивертора. *а* — соленоиды, *б* — катушка, создающая магнитное поле противоположного направления, *в* — вакуумные насосы, *г* — стенка вакуумной камеры.

к частоте одного из естественных периодов газа — времени между столкновениями, или времени, в течение которого заряженная частица проходит через секцию, где происходит нагрев, или же времени, в течение которого частица описывает окружность под действием основного магнитного поля, удерживающего плазму. Благодаря резонансу, количество тепла, получаемого газом за время сжатия, будет значительно превосходить количество тепла, теряемого за время расширения. Подробные теоретические исследования, еще не проверенные на опыте, указывают, что с помощью

магнитной накачки можно нагреть газ до термоядерных температур. Нагревание газа с помощью такого метода будет происходить, однако, не очень быстро; к тому же потери энергии, происходящие вследствие потери частиц и излучения энергии примесями, не позволяют достигнуть ультра-высоких температур.

В настоящее время конструируется установка много больших размеров, так называемая «модель С» стелларатора, которая должна оказать большую помощь в решении этих проблем. Вакуумная трубка в этой установке имеет форму рейстрекка; трубка будет иметь около 20 сантиметров в диаметре и 12 метров в длину; удерживающее поле будет равно

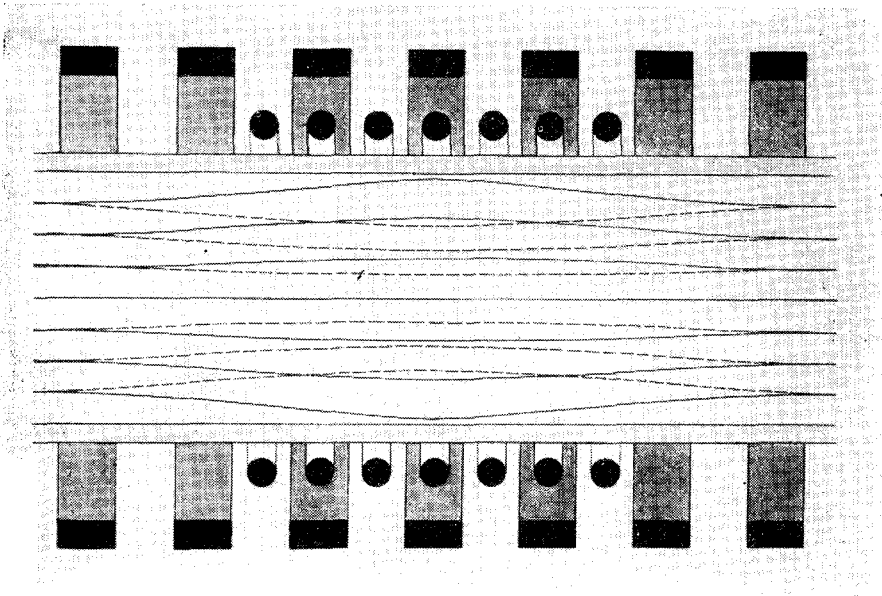


Рис. 7.

Магнитная накачка используется для нагревания газа до температуры, необходимой для осуществления термоядерной реакции. Экспериментальное устройство (показанное на рисунке в разрезе) состоит из вспомогательной катушки (черные кружки), по которой проходит ток. Этот ток попеременно расширяет (сплошные линии) и сжимает (пунктирные линии) силовые линии поля, создаваемого главной катушкой (черные прямоугольники.)

50 000 гаусс и будет закручено с помощью спиральных намоток. Диаметр трубки примерно в четыре раза больше, чем в большинстве имеющихся в настоящее время «моделей В»; соответственно меньшее отношение поверхности к объему должно понизить влияние потери частиц и примесей, попадающих в разряд. Наконец, мощная аппаратура магнитной накачки позволит попытаться получить ультравысокие температуры. Технические средства, требующиеся для этой установки, очень внушительны, так как максимальный уровень мощности, полученной от группы мотор-генераторов, должен составлять 150 000 квт и уровень мощности высокой частоты должен быть примерно того же порядка.

Если продолжающиеся исследования приведут к созданию реактора, отдающего полезную мощность, то как будет выглядеть такое устройство? Во-первых, стелларатор должен быть очень больших размеров, чтобы производить мощность большую, чем та, которая нужна для поддержания магнитного поля, необходимого для удержания плазмы. Если стелларатор увеличивается в размерах, причем напряженность магнитного поля и все

другие его свойства остаются постоянными, то мощность, идущая на поддержание магнитного поля, увеличивается только пропорционально линейным размерам. С другой стороны, получаемая термоядерная энергия возрастает пропорционально объему газа, т. е. пропорционально кубу линейных размеров. Критическая точка, в которой мощность, затрачиваемая на создание магнитного поля, равна мощности термоядерной реакции, может быть достигнута в установке очень больших размеров — с трубкой диаметром более метра и с акспальной длиной в сотни метров. Полная мощность, создаваемая такой установкой, будет порядка миллиона киловатт.

В качестве топлива для первого дающего полезную мощность стелларатора будет, вероятно, применяться смесь дейтерия и трития, так как синтез (слияние) ядер трития и дейтерия происходит в сто раз быстрее, чем слияние дейтронов между собой. Мощность будет отводиться из камеры реактора через прилегающую к ней оболочку, в которой будет по трубкам циркулировать вода. Содержащийся в воде водород будет получать энергию от нейтронов путем упругих столкновений, и вода, действуя как теплопередатчик, будет переносить тепло из стелларатора к внешним турбогенераторам. Чтобы пополнять расход трития, оболочка должна содержать литий; один из изотопов этого элемента сильно поглощает нейтроны, в результате чего происходит ядерное расщепление и образуются ядро трития и альфа-частица (ядро атома гелия). Оболочку будет окружать огромная катушка, по которой будет проходить электрический ток, создающий постоянное магнитное поле, необходимое для ограничения ионизованного газа.

Как только удастся нагреть газ до нужной температуры, такая установка будет действовать непрерывно. Свежие порции дейтерия и трития будут впускаться в камеру быстрой струей, а продукты реакции (главным образом, гелий) и примеси будут уходить в дивертор, где будут помещены очень большие насосы. Омическое нагревание и устройство для магнитной накачки будут нужны только для запуска стелларатора после случайных остановок.

Такой стелларатор должен быть сравним по величине и выходной мощности с большой гидроэлектростанцией, например такой, как в Гувер Дэм. Будет ли такая установка экономически осуществимой или даже вообще возможной, пока трудно сказать. Однако если она будет работать, то она будет давать миллионы киловатт на очень дешевом топливе.

---