

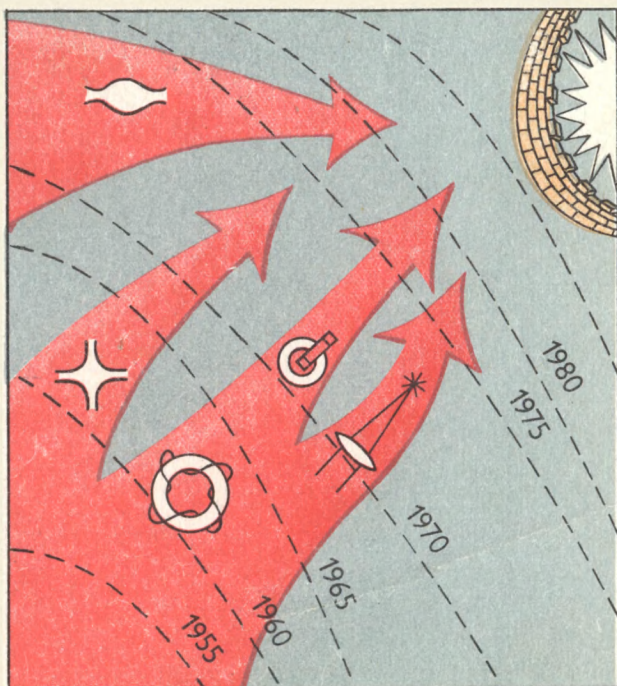


БИБЛИОТЕЧКА • КВАНТ •

ВЫПУСК 37

Г. С. ВОРОНОВ

ШТУРМ ТЕРМОЯДЕРНОЙ КРЕПОСТИ





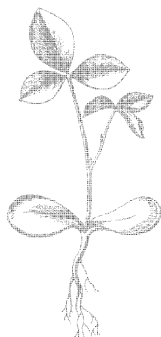
БИБЛИОТЕЧКА • КВАНТ •
выпуск 37

Г. С. ВОРОНОВ

ШТУРМ ТЕРМОЯДЕРНОЙ КРЕПОСТИ



**МОСКВА «НАУКА»
ГЛАВНАЯ РЕДАКЦИЯ
ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКОЙ ЛИТЕРАТУРЫ
1985**



Scan AAW

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ:

Академик И. К. Кикоин (председатель), академик А. Н. Колмогоров (заместитель председателя), профессор Л. Г. Асламазов (учевый секретарь), член-корреспондент АН СССР А. А. Абрикосов, академик Б. К. Вайнштейн, заслуженный учитель РСФСР Б. В. Воздвиженский, академик П. Л. Капица, профессор С. П. Капица, академик С. П. Новиков, академик Ю. А. Осипьян, академик АПН СССР В. Г. Разумовский, академик Р. З. Сагдеев, профессор Я. А. Смородинский, академик С. Л. Соболев, член-корреспондент АН СССР Д. К. Фаддеев, член-корреспондент АН СССР И. С. Шкловский.

Ответственный редактор выпуска С. В. Путвинский.

Рецензент доктор физико-математических наук В. А. Чуянов.

Воронов Г. С.

В75 Штурм термоядерной крепости.— М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1985.— 192 с.— (Библиотечка «Квант». Вып. 37.) — 30 к.

Энергия, которую мы получаем от Солнца, рождается в его недрах, где идут реакции термоядерного синтеза — водород превращается в гелий. Если бы удалось использовать эти реакции на Земле, человечество обеспечило бы себя энергией в изобилии. Вот уже тридцать лет термоядерная проблема остается центральной проблемой физики, и только сейчас стало ясно, что решить ее все-таки можно. В живой и доступной форме книга рассказывает о том, как развивались эти исследования, о выдающемся вкладе советских ученых в решение термоядерной проблемы, об остроумных идеях, смелых экспериментах, успехах и неудачах в борьбе с коварной и неуловимой плазмой.

Для школьников, преподавателей, студентов, лекторов.

В 1704070000—037
053(02)-85 187-84

ББК 22.333
530.3

ПРЕДИСЛОВИЕ

Вот уже более тридцати лет, с 1951 г., ученые всего мира работают над решением проблемы управляемого термоядерного синтеза. Сущность этой проблемы заключается в том, чтобы осуществить на Земле те же реакции ядерного синтеза — превращение водорода в гелий, которые служат источником энергии Солнца и других звезд.

Когда это удастся сделать, человечество будет навсегда избавлено от проблемы недостатка энергии. В отличие от нефти, угля или урана, запасы которых истощаются на наших глазах, запасы водорода в воде океанов практически не ограничены. Их хватит на миллионы лет при самых смелых прогнозах потребления энергии человечеством.

В названии этой проблемы не случайно подчеркнуто слово «управляемый». Потому что неуправляемый термоядерный синтез люди, увы, уже осуществили — в водородной бомбе. Для спасения человечества от энергетического голода нужно найти способ управлять реакциями термоядерного синтеза, чтобы они протекали спокойно и отдавали свою энергию постепенно, а не в виде всепоглощающего взрыва. Как сказал один американский ученый: «...человечество несомненно овладеет управляемым термоядерным синтезом, если не погибнет до этого от неуправляемого».

Проблема управляемого термоядерного синтеза (УТС) невероятно сложна. Настолько сложна, что только объединенными усилиями всего человечества можно надеяться решить ее в обозримые сроки. С другой стороны, это одна из тех проблем, которые самым очевидным образом затрагивают все страны мира. Поэтому работа по проблеме УТС почти с самого начала — с 1956 г., когда по инициативе советских ученых с проблемы УТС была снята завеса секретности, — проходит при самом тесном и плодотворном международном сотрудничестве.

Книга посвящается памяти моего учителя — Матвея Самсоновича Рабиновича — выдающегося ученого и обаятельного человека, отдавшего более двадцати лет своей жизни исследованиям по проблеме УТС. Его научная проницательность, мужество и

оптимизм в полной мере проявились в становлении и развитии стеллараторной программы — одного из наиболее перспективных направлений в решении проблемы УТС. Жизнерадостность, доброжелательность и чисто человеческое обаяние М. С. Рабиновича в немалой степени способствовали созданию той уникальной атмосферы сотрудничества, взаимопомощи и понимания, которая установилась среди ученых, работающих над проблемой управляемого термоядерного синтеза.

В ходе тридцатилетнего сражения с проблемой УТС использовались все новейшие достижения в области физики и техники. Многие разделы физики и, прежде всего, физики плазмы претерпели исключительно мощное развитие именно в связи с работой над проблемой УТС. Поэтому популярный рассказ о драматической истории этих исследований представляет достаточно сложную задачу.

Изложение ведется в расчете на любознательного читателя, имеющего образование в пределах программы средней школы.

Считаю своим приятным долгом сердечно поблагодарить члена-корреспондента АН СССР В. Д. Шафранова, доктора физико-математических наук В. А. Чуянова и доктора физико-математических наук И. С. Шпигеля, прочитавших книгу в рукописи и сделавших ряд ценных замечаний.

Автор

ГЛАВА I

ТЕРМОЯДЕРНАЯ ПРОБЛЕМА

Сверхсекретные исследования

Весной 1956 г. мир облетела сенсация: Игорь Васильевич Курчатов — ведущий советский физик, возглавлявший работы по созданию атомной и водородной бомбы, находясь в Англии в составе советской правительственной делегации, выступил в Харуэллском атомном центре с лекцией о фундаментальных исследованиях, проводимых в Советском Союзе. В своем выступлении он рассказал об экспериментах, поставленных с целью использовать те же ядерные реакции, которые идут в водородной бомбе, в мирных целях — для производства электроэнергии. Примеру Советского Союза последовали Англия и США. Завеса секретности была снята.

В 1956—1958 гг. одна за другой состоялись три международных конференции, где ученые разных стран обнародовали результаты работ, которые велись уже в течение нескольких лет в обстановке глубочайшей секретности.

Как возникла проблема

Собственно, сами термоядерные реакции — реакции синтеза (слияния) ядер — были открыты еще в 30-х годах в связи с изучением источника энергии, поддерживающего в горячем состоянии Солнце и другие звезды.

В недрах звезд в реакциях ядерного синтеза происходит соединение ядер водорода в ядро гелия. При этом выделяется огромная энергия. Вот эту-то энергию мы и получаем от Солнца в виде света и тепла. Но чтобы происходили эти реакции, нужна температура в десятки миллионов градусов.

В то время, когда были открыты эти реакции и разгадан источник звездной энергии, о практическом использовании термоядерных реакций на Земле нечего было и думать — никакого реального способа получить температуру в десятки миллионов градусов на Земле тогда не существовало.

Но вот прошли годы. Окончилась вторая мировая война. К концу войны было создано самое страшное оружие, когда-либо существовавшее на Земле, — атомная бомба.

В ходе исследования физических процессов, протекающих при взрыве атомной бомбы, было выяснено, что энергия, освобождающаяся при ядерной реакции деления урана, настолько велика, что температура может подниматься до миллионов градусов. Естественно, получив этот результат, сразу же вспомнили про термоядерные реакции, где необходима именно такая температура. Возникла идея использовать атомную бомбу в качестве «спички», чтобы поджечь еще и термоядерную реакцию и тем самым существенно повысить энергию взрыва.

Идея оказалась плодотворной и через несколько лет мир был потрясен испытательными взрывами термоядерных, или, как их тогда называли, водородных бомб с энергией взрыва, эквивалентной десяткам миллионов тонн обычного взрывчатого вещества — тротила.

С другой стороны, можно сказать, что энергия взрыва водородной бомбы равна энергии, которую все электростанции Земли вырабатывают за неделю. Из этого сравнения естественно рождается идея: вот если бы можно было и в самом деле заставить водородную бомбу взрываться медленно, в течение недели, а выделяющееся тепло использовать для выработки электроэнергии. Ведь сколько угля, нефти, газа сжигают за неделю электростанции Земли. А тут всего лишь несколько тонн водорода! Но для этого нужно заставить термоядерные реакции протекать не в виде взрыва, а медленно, постепенно, в контролируемых условиях. Одним словом, нужно научиться управлять ими. Так родилась проблема управляемого термоядерного синтеза (УТС).

Представим себе, что проблема УТС решена — термоядерный реактор создан. Что это даст? В чем собственно состоят преимущества термоядерной энергетики и насколько они велики?

Первое и главное преимущество уже упоминалось — термоядерная энергетика позволит решить проблему энергетического кризиса. В отличие от существующей энер-

гетики, которой угрожает ограниченность ресурсов нефти, газа, угля и урана, термоядерная энергетика будет работать на водороде, а запасы водорода в воде океанов практически не ограничены. (Точнее, термоядерный реактор будет работать на изотопе водорода — дейтерии, которого в природе в 6800 раз меньше, чем обычного водорода.) Кроме того, в термоядерном реакторе будет использоваться литий. Но и с учетом этих обстоятельств запасы термоядерного топлива очень велики, а его добыча и производство обходятся сравнительно дешево. Максимальное количество энергии, которое можно производить на Земле, не рискуя вызвать климатическую катастрофу, ограничено примерно 1% падающей на Землю солнечной энергии. При такой мощности запасов дейтерия в воде океанов хватит примерно на 300 миллионов лет.

Второе важное преимущество термоядерной энергетики — высокая экологическая чистота. Ни добыча исходных веществ — дейтерий и литий, ни отработанные продукты — инертный газ гелий, для окружающей среды опасности не представляют. Единственная причина беспокойства с этой точки зрения — нейтроны, рождающиеся в процессе производства энергии. Но сами по себе нейтроны полностью используются внутри реактора, а опасность появления наведенной радиоактивности может быть сведена к минимуму подбором конструкционных материалов. Непосредственно в ходе термоядерных реакций каких-либо сильно радиоактивных веществ, подобных продуктам деления урана, не образуется.

Третье преимущество — термоядерный реактор не производит веществ, которые могут быть использованы для производства атомного оружия. Поэтому нет опасности, что распространение термоядерной энергетики вызовет распространение атомного оружия.

Наконец, четвертое преимущество связано с тем, что в термоядерном реакторе, даже очень большой мощности, запас энергии и рабочих веществ довольно мал. Поэтому опасность взрыва полностью исключена, а опасность радиоактивного заражения окружающей среды в случае аварии невелика.

Преимущества оказались настолько велики и очевидны, что как только термоядерная проблема была сформулирована, она стала одной из главных научных проблем современности и все ведущие страны мира прилагают для ее решения большие усилия. Однако проблема оказалась невероятно сложной. настолько сложной, что только те-

перь, спустя 30 лет напряженной и дружной работы ученых всего мира, с уверенностью можно сказать, что решение проблемы УТС принципиально возможно.

Если бы тогда, в начале 50-х годов, физики представляли себе истинные масштабы стоящих перед ними трудностей, у них возможно и не хватило бы смелости браться за такую задачу.

В чем же состоят трудности? Чтобы в этом разобраться, нам нужно сначала понять как устроено атомное ядро, как протекают ядерные реакции и откуда вообще берется ядерная энергия?

Как устроено атомное ядро

Природа неисчерпаема и ядерная физика проникает в структуру ядра все глубже и глубже. Ситуация здесь напоминает русскую матрешку: ядро состоит из протонов и нейтронов, которые состоят из кварков, которые... Но нам для ответа на поставленный вопрос не нужно лезть так глубоко. Будем считать, что ядро состоит из протонов и нейтронов, между которыми действуют ядерные силы. Ядерные силы очень велики — на расстоянии 10^{-15} м они создают силу притяжения значительно большую, чем сила электрического отталкивания одноименно заряженных протонов.

Ядерные силы имеют одну важную особенность — они очень быстро спадают с увеличением расстояния между частицами. Поэтому, чтобы вызвать ядерную реакцию, нужно сблизить участвующие в ней частицы на расстояния 10^{-14} – 10^{-15} м. Это обстоятельство — одна из причин тех колоссальных трудностей, которые стоят на пути решения термоядерной проблемы. Но об этом позже. Сейчас нас интересует происхождение ядерной энергии.

Откуда берется ядерная энергия?

Простейшее ядро — ядро атома водорода, состоит только из одного протона. Энергию, которая заключена в этом ядре, легко подсчитать по формуле Эйнштейна $E=mc^2$. Масса протона $m_p=1,67 \cdot 10^{-27}$ кг, скорость света $c=3 \cdot 10^8$ м/с. Отсюда получаем $E=1,5 \cdot 10^{-10}$ Дж или 938 МэВ *).

*) 1 МэВ= 10^6 эВ (электронвольт). Электронвольт — единица энергии, принятая в атомной физике (1 эВ= $1,6 \cdot 10^{-19}$ Дж). Такую же энергию теплового движения частицы имеют при температуре 11 600 К.

Это очень большая энергия. При нормальных условиях в одном кубическом метре водорода содержится $2,7 \cdot 10^{25}$ молекул H_2 и, значит, $5,4 \cdot 10^{25}$ протонов. Полная энергия, которую содержит 1 м³ водорода, составляет $8,1 \cdot 10^{15}$ Дж или $2,25 \cdot 10^9$ кВт·ч. Это число можно сравнить разве что с выработкой электроэнергии в нашей стране за день. В 1985 г. ее намечено произвести примерно $15,4 \cdot 10^{11}$ кВт·ч. Таким образом, если бы мы умели полностью извлекать энергию, заключенную в атомных ядрах, для производства всей электроэнергии в нашей стране за год понадобилось бы всего лишь около $7 \cdot 10^2$ м³, или 64 кг, водорода.

К сожалению, полностью извлечь энергию, содержащуюся в атомных ядрах, можно только одним способом — соединив их с ядрами из антиматерии. При столкновении протона p с антипротоном \bar{p} происходит их взаимное уничтожение (аннигиляция), а выделяемая при этом энергия полностью переходит в энергию γ -квантов: $p + \bar{p} \rightarrow \gamma + \gamma$. Гамма-кванты можно поглотить в толстом слое вещества и выделившееся тепло использовать для производства электроэнергии. Задержка за малым — негде взять в достаточном большом количестве антипротоны. Так что этот способ, увы, ничего практически полезного не обещает.

Посмотрим тогда, как можно извлечь энергию из более сложных ядер. Во всех ядрах атомов любого элемента число протонов одно и то же и равно номеру данного элемента в таблице Менделеева, а число нейтронов может быть различным. Такие атомы называются изотопами.

В физике принято все изотопы данного элемента обозначать одним и тем же символом, а чтобы отличать их друг от друга, слева вверху указывается суммарное число протонов и нейтронов — так называемое массовое число ядра A . Иногда для еще большей определенности слева внизу указывают число протонов z . Например, ${}^2_2\text{He}$ или ${}^4_2\text{He}$ — изотопы гелия. Оба изотопа имеют в ядрах по 2 протона и, следовательно, попадают в ячейку № 2 в таблице Менделеева. Но изотоп ${}^3\text{He}$ имеет всего 3 частицы в ядре — 2 протона и 1 нейтрон, а ${}^4\text{He}$ — 4 частицы — 2 протона и 2 нейтрона. Так как массы протона и нейтрона примерно одинаковы, то, следовательно, атом изотопа ${}^3\text{He}$ примерно в 3, а ${}^4\text{He}$ в 4 раза тяжелее атома водорода. Изотопы водорода — дейтерий и тритий в соответствии с этими правилами должны обозначаться так: ${}^2\text{H}$ и ${}^3\text{H}$. Но в действительности, их чаще обозначают специальными символами D и T , без указания дальнейших подробностей.

Для измерения массы в атомной физике ввели атомную единицу массы (а. е. м.) как $1/12$ массы изотопа углерода ^{12}C . В этих единицах массы «деталей», из которых состоят атомы, равны: электрона $m_e=0,000548$, протона $m_p=1,007276$, нейтрона $m_n=1,008665$ а. е. м. И вот что любопытно. Если сложить массы протона и электрона, из которых состоит атом водорода, то все более менее сходится. Но вот для более сложных атомов получается парадокс — масса атома оказывается заметно меньше, чем сумма масс составляющих его частей. Для гелия ^4He суммарная масса двух протонов, двух нейтронов и двух электронов — 4,0330, а масса атома гелия — 4,0026, для трития получается 3,2519 вместо 3,0165, для дейтерия — 2,0165 вместо 2,0141. Это что же — нарушение закона сохранения массы? Более того, в силу соотношения Эйнштейна $E=mc^2$ при этом и закон сохранения энергии тоже нарушается? Нет, конечно. Просто подсчитывая сумму масс частей при создании сложных ядер, мы не учли выделяющуюся при этом энергию, а она в силу этого самого соотношения $E=mc^2$ приводит к недостатку массы. Энергия в процессе соединения протонов и нейтронов в ядро выделяется в виде энергии испускаемой при этом частицы — фотона, или же в виде кинетической энергии образующихся в результате реакции частиц. Если учесть эту энергию, то с законами сохранения массы и энергии все получается в порядке.

Энергия, которую мы не учли и которая породила этот парадокс с массой, называется энергией связи. Она создается за счет работы ядерных сил в процессе образования связанной системы — ядра из бывших до этого свободными частиц.

На самом деле это совершенно заурядное явление, с которым мы сталкиваемся ежедневно. Когда камень падает на Землю, возникает связанная система — камень — планета Земля, а энергия связи выделяется в виде энергии разрушения грунта и тепла. И когда дрова сгорают в печке, возникает связанная система — атомы углерода и кислорода соединяются в молекулу углекислого газа CO_2 . При этом энергия связи (около 1 эВ на молекулу) выделяется в виде тепла, а масса молекулы CO_2 получается, соответственно, на $1 \text{ эВ}/c^2$ меньше, чем сумма масс атомов углерода и кислорода. Только в случае Земли и камня или углерода и кислорода изменение массы при выделении энергии связи ничтожно мало, и поэтому мы его не замечаем.

В случае ядерных реакций оно уже вполне заметно. Кубический метр дейтерия имеет массу на 1,14 г больше, чем кубический метр гелия, а ведь число протонов, нейтронов и электронов, содержащихся в этом кубическом метре, в обоих случаях одинаково! Изменением массы

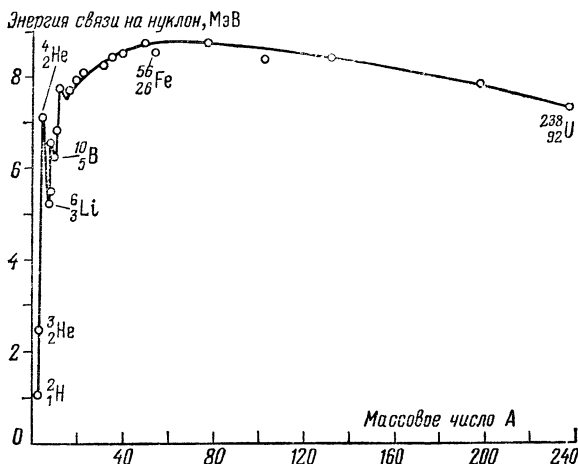


Рис. 1.1. Зависимость энергии связи ядер от массового числа ядра A .

можно воспользоваться для измерения энергии связи и в других ядрах. Результаты таких измерений показаны на рис. 1.1. С помощью соотношения $E=mc^2$ из разности масс вычислена энергия связи. Чтобы сравнивать ядра с различным числом частиц между собой, энергию связи удобно поделить на массовое число ядра A . Вот эта величина — энергия связи, приходящаяся на одну частицу в ядре (нуклон), и показана на рис. 1.1 в зависимости от массового числа ядра A . Видно, что сначала с увеличением A энергия связи стремительно растет. При $A \approx 40$ (аргон) рост замедляется. Максимальную энергию связи имеют ядра железа. А при еще большем числе частиц в ядре энергия связи начинает уменьшаться. Так происходит потому, что при большом числе частиц в ядре часть из них оказывается друг от друга на расстоянии, сравнимом с радиусом действия ядерных сил, где притяжение уже ослабевает. Кроме того, с увеличением числа протонов растет и энергия их электрического отталкивания. К концу таблицы Менделеева, для тория и

урана, энергия связи уже заметно меньше, чем для ядра железа.

Из рис. 1.1 сразу видно, что есть два пути для извлечения ядерной энергии; можно либо соединять легкие ядра, типа водорода или дейтерия, в более тяжелые, либо, наоборот, расщеплять самые тяжелые ядра, типа урана, на осколки с $A \approx 60$, где энергия связи максимальна. Ядерные реакции, в которых из легких ядер создается более тяжелое, называются реакциями ядерного синтеза. Из рис. 1.1 видно, что для получения энергии методом ядерного синтеза пригодны любые ядра от водорода до железа. Реакции расщепления тяжелых ядер называют реакциями деления. Для использования в реакции деления в принципе пригодны любые ядра от урана до железа.

Таким образом, мы выяснили, откуда берется ядерная энергия. Ее источник и в случае реакций деления, и в случае реакций синтеза один и тот же — энергия связи протонов и нейтронов внутри ядра, возникающая за счет действия ядерных сил.

Борьба с кулоновским отталкиванием

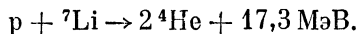
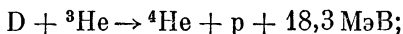
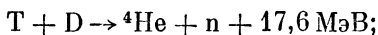
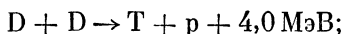
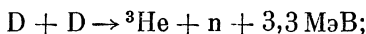
Исторически первой была поставлена на службу человечества реакция деления. Атомные электростанции, основанные на реакциях деления урана и плутония, уже работают, а использование реакции ядерного синтеза для получения энергии все еще находится на стадии исследований.

И это не случайно. Использование реакции синтеза оказалось гораздо более трудным делом, чем реакции деления, из-за влияния электрических сил. Силы электрического отталкивания между одноименно заряженными протонами препятствуют сближению ядер в реакции синтеза, а в реакции деления они, наоборот, способствуют разлету осколков делящегося ядра. Поэтому чтобы произвести реакцию синтеза, надо сначала преодолеть электрическое отталкивание ядер.

Силы электрического отталкивания, естественно, тем больше, чем больше заряд ядра. Чтобы сблизить два ядра с зарядами q_1 и q_2 на расстояние r , нужно, согласно закону Кулона, затратить энергию

$$E = k \frac{q_1 q_2}{r},$$

где k — постоянная, зависящая от выбранных единиц измерения. (В системе СИ $|k| = 9 \cdot 10^9$.) Сближать ядра, чтобы они вступили в реакцию синтеза, нужно примерно до $r = 10^{-14}$ м, где уже становится заметным действие ядерных сил. Дальше притяжение, вызванное ядерными силами, преодолит кулоновское отталкивание и ядра сольются — произойдет реакция синтеза. Для изотопов водорода энергия электрического отталкивания составляет около 0,15 МэВ. Это очень большая энергия. Такую среднюю энергию ядра водорода будут иметь, если их нагреть до температуры $\sim 1,6 \cdot 10^9$ К. Для других ядер нужна еще большая температура. Поэтому, хотя из рис. 1.1 мы видели, что в принципе ядерную энергию можно извлекать за счет реакции синтеза, используя любые вещества от водорода и до железа, трудности преодоления кулоновского отталкивания ядер заставляют сосредоточиться на реакциях с участием самых легких ядер — изотопов водорода, гелия, лития. При участии этих элементов возможно довольно много разных реакций ядерного синтеза, вот некоторые из них:



Какой же из этих реакций отдать предпочтение? В каждой реакции выделяется внушительная энергия, измеряемая миллионами электронвольт. Затраты же энергии на преодоление кулоновского барьера, как мы видели, для реакций с участием только изотопов водорода $\sim 0,15$ МэВ, с участием гелия $\sim 0,3$ МэВ, с участием лития $\sim 0,5$ МэВ. В любом случае в принципе можно получить выигрыш в энергии. Решающее значение при выборе реакции имеет возможность достижения условий, при которых выбранная реакция идет со скоростью, представляющей практический интерес.

Посмотрим, в первую очередь, какие реакции происходят на Солнце и в водородной бомбе.

Что происходит на Солнце?

На Солнце исходным веществом служат протоны, а в результате образуются ядра гелия ${}^4\text{He}$. Этот конечный результат может получиться из двух циклов реакций — водородного и углеродно-азотного. Водородный цикл состоит из четырех реакций:

Реакция	Выделяемая энергия, МэВ	Среднее время реакции
$p + p \rightarrow D + e^+ + \nu$	0,4	$1,4 \cdot 10^{10}$ лет
$e^+ + e^- \rightarrow 2\gamma$	1	10^{-19} с
$p + D \rightarrow {}^3\text{He} + \gamma$	5,5	5,7 с
${}^3\text{He} + {}^3\text{He} \rightarrow {}^4\text{He} + 2p$	12,85	10^8 лет

Сначала два протона, соединяясь, образуют ядро дейтерия или, как его еще называют, дейтон D. При этом образуются также позитрон e^+ и нейтрино ν . Нейтрино улетает прочь, унося с собой 0,257 МэВ энергии, а позитрон аннигилирует с ближайшим электроном, превращаясь в два γ -кванта. При этом выделяется еще 1 МэВ энергии. Гамма-квант поглощается окружающим веществом, так что эта энергия остается на Солнце. Образовавшийся в первой реакции дейтон D, соединяясь с протоном, образует ядро гелия ${}^3\text{He}$. При этом выделяется еще 5,5 МэВ энергии. Наконец, два ядра ${}^3\text{He}$, образовавшихся на предыдущем этапе, соединяются в ядро ${}^4\text{He}$, при этом снова рождаются два протона и выделяется 12,85 МэВ энергии. Замкнутый цикл получается, если каждая из первых трех реакций происходит дважды. Всего в таком замкнутом цикле выделяется 26,7 МэВ энергии, из них примерно 0,5 МэВ уходит с нейтрино.

В углеродно-азотном цикле ядро углерода ${}^{12}\text{C}$ служит как бы катализатором. Соединение четырех протонов в ядро гелия происходит в результате цикла из шести реакций:

Реакция	Выделяемая энергия, МэВ	Среднее время реакции
$p + {}^{12}\text{C} \rightarrow {}^{13}\text{N} + \gamma$	1,95	$1,3 \cdot 10^7$ лет
${}^{13}\text{N} \rightarrow {}^{13}\text{C} + e^+ + \nu$	1,57	7 мин
$p + {}^{13}\text{C} \rightarrow {}^{14}\text{N} + \gamma$	7,54	$2,7 \cdot 10^8$ лет
$p + {}^{14}\text{N} \rightarrow {}^{15}\text{O} + \gamma$	7,35	$3,3 \cdot 10^8$ лет
${}^{15}\text{O} \rightarrow {}^{15}\text{N} + e^+ + \nu$	1,73	82 с
$p + {}^{15}\text{N} \rightarrow {}^{12}\text{C} + {}^4\text{He}$	4,96	$1,1 \cdot 10^5$ лет

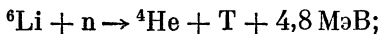
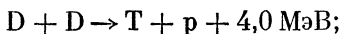
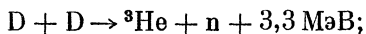
В результате этого цикла реакций снова получается ядро ${}^{12}\text{C}$, а из четырех протонов образуется ядро ${}^4\text{He}$. При этом выделяется 25,03 МэВ энергии и 1,7 МэВ уносится с нейтрино. Обратим теперь внимание на третий

столбец таблицы. Там приведено среднее время реакции, рассчитанное для условий в недрах Солнца — температуры около 15 миллионов градусов и плотности водорода 10^5 кг/м³. Время $1,4 \cdot 10^{10}$ лет велико даже в космических масштабах. За время жизни Солнца (около $5 \cdot 10^9$ лет) в реакции образования дейтерия успела участвовать лишь малая часть имеющегося на Солнце водорода. Как видно из приведенных таблиц, многие другие реакции, входящие в оба цикла, природа также осуществляет не торопясь. В результате выделение ядерной энергии на Солнце происходит довольно медленно — около 20 Вт/м³. Это значительно меньше, чем, например, скорость выделения тепла в теле человека — около 200 Вт в объеме $\sim 0,1$ м³, или 2000 Вт/м³. Почему же тогда Солнце такое горячее? Только благодаря своим грандиозным размерам.

Ясно, что прямое воспроизведение солнечных условий и солнечного цикла реакций на Земле для использования в качестве источника энергии смысла не имеет. Нужно создать такие условия или выбрать такие реакции, чтобы скорость выделения энергии была бы существенно больше.

А в водородной бомбе?

Посмотрим теперь, что происходит в водородной бомбе. Как уже говорилось, в первую очередь, в водородной бомбе происходит реакция деления урана или плутония. Выделяющееся при этом тепло повышает температуру до нескольких миллионов градусов. Что же происходит дальше? Кроме урана в состав водородной бомбы вводят изотопы водорода — дейтерий и тритий и изотоп лития ^6Li . При высокой температуре с этими ядрами происходят следующие реакции:



Высокая температура при взрыве атомной бомбы сохраняется только в течение нескольких миллионных долей секунды. Поэтому исходные вещества должны иметь максимальную плотность. Практически используются твердые соединения лития с дейтерием и тритием типа

LiD или LiT . Скорость выделения энергии при этих условиях, как известно, очень велика $\sim 10^{17}$ Дж за 10^{-5} с, или 10^{22} Вт. Для практического использования в качестве источника энергии она даже слишком велика. Ведь мощность самых крупных из существующих сейчас электростанций не превышает 10^{10} Вт. Таким образом, получается, что скорость реакций в термоядерном реакторе должна быть существенно больше, чем на Солнце, и столь же существенно меньше, чем в водородной бомбе.

От чего же зависит скорость реакции?

Возьмем какое-нибудь ядро и попробуем с его помощью произвести ядерную реакцию. Как мы видели, прежде всего нужно позаботиться о преодолении кулоновского барьера. Для этого разгоним ядро

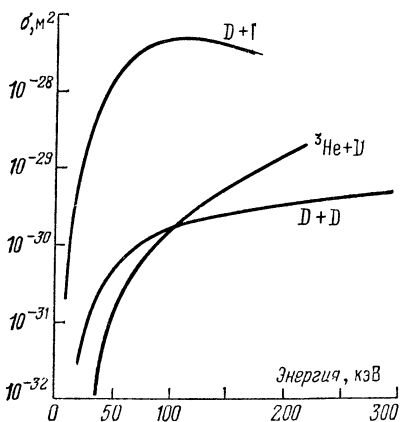


Рис. 1.2. Сечение реакций ядерного синтеза в зависимости от энергии налетающего ядра.

до большой скорости (пусть это будет v м/с) после чего направим это ядро на ядро-мишень. Так как ядро мишени очень маленькое, попасть в него не так-то просто. Поскольку ядерные силы действуют только на расстоянии $\sim 10^{-14}$ м, то и «точность» попадания должна быть такого же масштаба.

Если для простоты представить оба ядра в виде твердых шариков радиусами r_1 и r_2 , то столкновение произойдет, если расстояние

между ядрами (шарами) окажется в какой-то момент меньше, чем $r_1 + r_2$. Можно представить налетающее ядро в виде диска радиусом $R = r_1 + r_2$, а ядра мишени точками и считать, что реакция происходит каждый раз, когда ядро мишени оказывается в пределах диска. Скорость реакции в такой модели легко подсчитать: налетающее ядро пройдет за 1 с путь v м. Площадь диска радиусом R равна $\sigma = \pi R^2$, и, значит, вдоль траектории налетающей частицы образуется объем $V = \sigma v$ м³, в пределах которого

и могут происходить реакции. Если плотность ядер в мишени равна n_2 ядер/м³, то в этом объеме окажется $n_2 V = n_2 \sigma v$ ядер и, значит, произойдет $n_2 \sigma v$ реакций. Если пускать n_1 налетающих частиц в секунду, то всего за 1 с будет происходить $n_1 n_2 \sigma v$ реакций.

На самом деле в природе все гораздо сложнее; ядра — это не просто твердые шарики, а расстояние, на которое нужно сблизить ядра, чтобы они вступили в реакцию, определяется противоборством ядерных и электрических сил и зависит от скорости сближения ядер.

Чтобы рассчитать скорость реакции по аналогии с этой простейшей моделью, вводят понятие эффективного сечения реакции и обозначают его той же самой буквой σ . Так что все сложности сводятся к расчету или измерению значения сечения σ . Но если σ известно, то скорость реакции можно рассчитать, как и в простейшей модели, по формуле $n_1 n_2 \sigma v$.

На рис. 1.2 показаны результаты измерений эффективных сечений различных реакций синтеза в зависимости от энергии налетающей частицы. Видно, что самое большое сечение — до $5 \cdot 10^{-28}$ м² — имеет реакция D+T. Затем идут реакции D+D, ³He+D. Но сечение этих реакций примерно в 100 раз меньше, чем для D+T. Сечения других реакций еще меньше.

Сечения всех реакций при энергии налетающей частицы меньшей 5 кэВ очень малы и достигают заметных значений при энергиях 50–100 кэВ или еще больше. Но в результате реакции синтеза выделяется энергия в миллионы электронвольт. Поэтому все они остаются энергетически выгодными — затратив сотни тысяч электронвольт энергии на ускорение ядра, получаем в результате реакции ядерного синтеза миллионы электронвольт.

Раз, два и в дамки!

Отсюда сразу же возникает идея использовать эту простейшую схему — пучок ускоренных ядер плюс мишень для получения энергии ядерного синтеза. Ускоритель на энергию в сотни тысяч электронвольт сделать несложно — достаточно пропустить заряженную частицу между двумя электродами, на которые подано соответствующее напряжение, и она получит нужную энергию. Так что реактор по этой самой схеме получается несложным и недорогим. Но увы, работать он не сможет. И вот почему.

Когда ускоренное ядро налетает на мишень, в ней начинают происходить не только реакции ядерного синтеза, которых мы ждем, но и множество других процессов. Самый неприятный из них — ионизация. Электрическое поле быстро движущегося ядра отрывает электроны от атомов мишени, на что затрачивается энергия 30—40 эВ на каждый акт ионизации. Сама по себе по сравнению с энергией ускоренного ядра она невелика, но все дело в количестве таких актов.

Для того чтобы произошла ионизация, достаточно налетающему ядру пройти где-либо внутри атома. Размеры атома обычно около 10^{-10} м, значит сечение ионизации будет около 10^{-20} м². Как мы видели выше, сечение реакции ядерного синтеза значительно меньше — что-то около 10^{-28} м². Это значит, что вероятность ионизации примерно в 10^8 раз выше, чем вероятность ядерной реакции. Следовательно, на каждую реакцию ядерного синтеза, в которой освобождается энергия, скажем, в 20 МэВ, будет приходиться 10^8 актов ионизации и будет затрачено 4 ГэВ энергии. Поэтому реактор по схеме пучок ядер плюс мишень получается весьма убыточным — он сможет производить в 200 раз меньше энергии, чем затрачено.

Пучок плюс плазма

Попробуем все-таки спасти идею. Раз все дело в ионизации — давайте уберем ионизацию! Возьмем мишень из уже ионизованных атомов. (Про вещество, находящееся в таком состоянии, говорят, что оно находится в виде плазмы.) Ну значит, возьмем в качестве мишени для пучка ускоренных ядер плазму. Что тогда?

В плазме потеря энергии на ионизацию не будет. Но это, к сожалению, не единственный вид потерь. Быстрое ядро, двигаясь в плазме, будет терять энергию при упругих соударениях с заряженными частицами, из которых состоит плазма, — электронами и ионами. При этих соударениях энергия налетающего ядра будет переходить к частицам плазмы и нагревать их. И снова подсчет числа таких соударений и энергии, которая будет потеряна в них, показывает, что баланс энергии получается отрицательным. Что еще можно сделать? Оказывается, кое-что все-таки можно!

Частицы пучка будут терять энергию в упругих столкновениях с частицами плазмы только в том случае, если их энергия превышает энергию частиц плазмы. Если плаз-

му нагреть так, чтобы энергия ее частиц стала равной энергии ядер в пучке, потерь энергии на упругие столкновения не будет. Беспольные потери энергии частицами пучка в основном происходят в соударениях с электронами. Так что достаточно нагреть только электроны, а ионы можно оставить холодными. Вот это уже работоспособная идея! С помощью пучка ускоренных ядер и плазмы с горячими электронами действительно можно соорудить реактор с положительным балансом энергии! Более того, если приготовить плазму, в которой и ионы тоже будут горячими, можно даже отказаться от пучка! Действительно, раз энергия частиц плазмы такая же, как и частиц пучка, при их столкновениях также будут происходить ядерные реакции. Нужно только ввести в состав плазмы необходимые вещества. Таким образом, мы пришли к основной идее, как использовать реакции ядерного синтеза для получения энергии — нужно взять исходные вещества в виде достаточно горячей плазмы, и тогда реакции ядерного синтеза будут происходить за счет энергии теплового движения частиц. Такой способ осуществления реакций ядерного синтеза называли термоядерным синтезом. В частности, именно термоядерные реакции, идущие в недрах нашего Солнца, поддерживают его в горячем состоянии.

Какая же нужна температура?

В теле, нагретом до температуры T , частицы движутся со средней энергией $\frac{mv^2}{2} = \frac{3}{2}kT$. Здесь k — постоянная Больцмана, равная $1,4 \cdot 10^{-23}$ Дж/К. Грубую оценку необходимой температуры можно получить так: найдем такую температуру, чтобы энергия теплового движения частиц была 50 или 100 кэВ, когда сечения реакций имеют максимальные значения. Получается $T = 1,3 \cdot 10^9$ К — больше миллиарда градусов! Но, к счастью, при тепловом движении энергия частиц отнюдь не одинакова. Частицы вещества, нагретого до температуры T , только в среднем имеют энергию $\frac{3}{2}kT$, а энергия каждой конкретной частицы может быть как меньше, так и больше этой величины. За счет этих энергичных частиц термоядерные реакции могут происходить и при более низкой температуре, когда энергия основной массы частиц слишком мала.

Чтобы подсчитать скорость термоядерных реакций в этих условиях, нужно знать, сколько частиц обладает

большой энергией, а сколько малой. Закон распределения частиц по энергиям в веществе, нагретом до температуры T , нашел в 1860 г. английский ученый Джеймс Кларк Максвелл.

Полное число реакций, происходящих в секунду, можно подсчитать, если суммировать вклад частиц всех энергий. Результат такого расчета для реакций $D+T$ и $D+D$

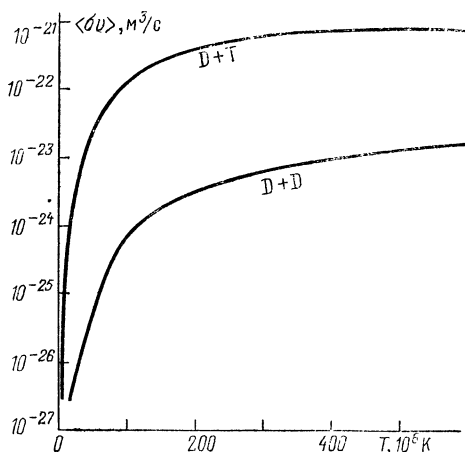


Рис. 1.3. Зависимость величины $\langle \sigma v \rangle$, определяющей скорость термоядерной реакции, от температуры.

показан на рис. 1.3. Здесь по вертикали отложено произведение σv , просуммированное по всем значениям скорости с учетом относительного числа частиц, обладающих такой скоростью, поэтому значение этого произведения заключено в угловые скобки ($\langle \rangle$).

Усредненная по распределению Максвелла величина $\langle \sigma v \rangle$ очень удобна для дальнейших расчетов. Чтобы найти, например, скорость реакции, достаточно умножить ее на плотность (число частиц в m^3) исходных продуктов n_1 и n_2 . Получаем число реакций в секунду на кубический метр: $S = n_1 n_2 \langle \sigma v \rangle$. Зависимость величины $\langle \sigma v \rangle$ от температуры показана на рис. 1.3. Температура отложена в миллионах кельвинов. Видно, что скорость термоядерной реакции $D+T$ становится заметной только при температуре 50–100 миллионов кельвинов.

Для реакции $D+D$ $\langle \sigma v \rangle$ значительно ниже. Видно, что скорость реакции $D+D$ остается существенно меньшей,

чем реакции $D+T$ и при более высокой температуре. Для других реакций нужна еще большая температура. Получение таких высоких температур представляет одну из главных трудностей на пути осуществления управляемых термоядерных реакций. С этой точки зрения реакция $D+T$ имеет явное преимущество перед всеми другими реакциями.

Итак, сосредоточим наше внимание на реакции $D+T$ и посмотрим, при каких условиях на ее основе можно создать термоядерный реактор.

Реактор сможет поддерживать самого себя в рабочем состоянии и отдавать еще сверх этого некоторую энергию потребителям только в том случае, если в результате термоядерной реакции будет выделяться большая мощность, чем мощность всех потерь. Потери энергии могут быть связаны, например, с недостаточно хорошей теплоизоляцией вещества, нагретого до миллиона градусов. При такой температуре электроны оторвутся от атомов и образуется плазма. Если взять исходную смесь из $n/2$ атомов дейтерия и $n/2$ атомов трития на кубический метр, то после образования плазмы появится еще n электронов и всего, стало быть, в плазме будет $2n$ частиц на кубический метр. Посмотрим теперь, сколько же нужно затратить энергии на нагрев такой плазмы. Для простоты будем считать, что и электроны, и ядра дейтерия и трития все имеют одинаковую температуру T . Как мы знаем, на каждую частицу при этих условиях в среднем приходится энергия $\frac{3}{2}kT$ и, значит, $2n$ частиц в кубическом метре будут иметь энергию $E = \frac{3}{2}kT \cdot 2n = 3kTn$.

Мы будем рассматривать стационарно (непрерывно) работающий реактор. Потери энергии в таком реакторе принято характеризовать временем удержания энергии плазмы τ_E . Время удержания энергии зависит от тех мер, которые мы предпримем для тепловой изоляции горячей плазмы от холодных стенок реактора. Его можно определить из такого мысленного опыта. Представим себе, что мы нагрели плазму до температуры T , а затем выключили нагревание. Из-за несовершенства теплоизоляции плазма начнет остывать. Каждую секунду плазма будет терять энергию $3kTn/\tau_E$.

В стационарно работающем реакторе эти потери должны быть скомпенсированы. Частично эту компенсацию можно осуществить за счет энергии, выделяющейся в результате термоядерных реакций в самом реакторе. В реакции $D+T \rightarrow \text{He} + n + 17,6 \text{ МэВ}$ выделяющаяся энергия

делится между продуктами реакции так: 3,5 МэВ достается ядру ${}^4\text{He}$, а 14,1 МэВ приходится на долю нейтрона. Если плотность и размеры плазмы достаточно велики, энергия, приходящаяся на долю ядра ${}^4\text{He}$, может быть практически полностью передана частицам плазмы. Для этого ядро ${}^4\text{He}$ должно испытать достаточно много столкновений с частицами плазмы, прежде чем доберется до стенки реактора. Однако для нейтрона плазма практически прозрачна и он уйдет на стенку реактора со всей своей энергией. Там можно устроить специальный поглотитель, в котором энергия нейтрона выделится в виде тепла. Затем это тепло можно преобразовать в электроэнергию и часть этой электроэнергии использовать для подогрева плазмы.

Допустим, это можно сделать с неким коэффициентом полезного действия η . Оценки показывают, что значение к. п. д. в таком многоступенчатом процессе вряд ли будет больше 30%. Таким образом, мы будем считать, что в плазму можно возратить энергию $E = E_{\text{зар}} + \eta E_{\text{н}}$, где $E_{\text{зар}}$ — энергия, выделяющаяся в термоядерной реакции в виде энергии заряженных частиц, $E_{\text{н}}$ — энергия, приходящаяся на долю нейтрона.

Теперь мы попытаемся составить баланс тепла для плазмы в реакторе с положительным выходом. Так как плотность ядер D и T в нашем реакторе равна $n/2$, в кубическом метре плазмы в секунду будет происходить $\langle \sigma v \rangle n^2/4$ число термоядерных реакций. При этом, как мы только что рассмотрели, из выделившейся при каждой реакции энергии можно возратить в плазму энергию $E_{\text{зар}} + \eta E_{\text{н}}$. Тогда в плазме будет выделяться энергия $(E_{\text{зар}} + \eta E_{\text{н}}) \langle \sigma v \rangle n^2/4$ и она должна быть больше или равна потерям энергии $3kTn/\tau_E$. Итого получаем баланс: $(E_{\text{зар}} + \eta E_{\text{н}}) \langle \sigma v \rangle n^2/4 \geq 3kTn/\tau_E$. Отсюда находим, что для успешной работы термоядерного реактора необходимо следующее условие:

$$n\tau_E \geq \frac{12kT}{(E_{\text{зар}} + \eta E_{\text{н}}) \langle \sigma v \rangle}.$$

Для реакции T+D правая часть этого неравенства имеет минимум при температуре $T=10^8$ К. $\langle \sigma v \rangle = 10^{-22}$ м³/с, $E_{\text{зар}} = 3,5$ МэВ, $E_{\text{н}} = 14,1$ МэВ, $\eta = 30\%$ получается $n\tau_E \geq 2 \cdot 10^{20}$ с/м³. Это условие называется критерием Лоусона, по имени английского физика, который его вывел.

Для реакции D+D значения как E , так и $\langle \sigma v \rangle$ значительно меньше, чем для реакции D+T. Поэтому даже

при температуре $T=4 \cdot 10^8$ К условие Лоусона для реакции $D+D$ получается гораздо более трудно выполнимым: $n\tau_E \geq 5 \cdot 10^{22}$ с/м³.

Чтобы представить эти цифры, проделаем мысленный опыт — возьмем смесь дейтерия и трития такой же плотности, как у атмосферного воздуха $n=2 \cdot 10^{25}$ м⁻³. Тогда из условия Лоусона для реакции $D+T$ ($n\tau_E \geq 2 \cdot 10^{20}$ с/м³) получаем, что время удержания энергии в реакторе τ_E должно быть больше 10^{-5} с. На первый взгляд кажется, что это немного. Но при такой плотности ($2 \cdot 10^{25}$ м⁻³) и такой температуре (10^8 К) давление смеси будет несколько сот тысяч атмосфер. Удержание вещества, раскаленного до ста миллионов градусов, при таком давлении даже и в течение стотысячной доли секунды — сложнейшая проблема. Да и работа термоядерного реактора при таких условиях будет похожа на взрыв огромной силы.

Можно поступить иначе. Снизим плотность, скажем, до $2 \cdot 10^{20}$ м⁻³, тогда давление плазмы будет около 1 атм, но зато время удержания возрастет до 1 с.

Как мы видим, можно выбирать разные варианты работы реактора, если только... Если только удастся решить главный вопрос — а как или чем можно удерживать вещество при такой температуре, в сто миллионов градусов. Ведь самые тугоплавкие материалы, известные нам, не выдерживают и десяти тысяч градусов. К тому же при такой высокой температуре вещество будет находиться в состоянии плазмы и значит для осуществления управляемого термоядерного синтеза нам придется нагревать и удерживать плазму.

Что такое плазма?

Собственно говоря, к тому времени, когда возникла термоядерная проблема, понятие плазмы было физикам достаточно знакомо — его ввел в 1923 г. американский физик Ленгмюр. Он изучал электрические разряды в газах. В условиях электрического разряда газ неизбежно переходит в плазменное состояние.

Надо сказать, изучение электрического разряда в газах много дало современной физике. При этих исследованиях были совершены такие фундаментальные открытия, как открытие электрона, рентгеновских лучей, изотопов.

Но несмотря на это, изучением физики плазмы до 50-х годов занимались очень мало. Термоядерная пробле-

ма выдвинула физику плазмы в число наиболее актуальных проблем сегодняшнего дня. Сейчас изучением физики плазмы занимаются тысячи ученых всего мира. Практически каждый университет или крупный исследовательский институт имеет лабораторию физики плазмы. Но в то время — в начале 50-х годов — о свойствах плазмы известно было довольно мало. Впрочем, свойства, позволившие наметить основные направления решения проблемы термоядерного синтеза, были уже известны.

Главное, что отличает плазму от обычного газа, это то, что она состоит из заряженных частиц — электронов и ионов. А движением заряженных частиц, как известно, можно управлять с помощью электрических и магнитных полей.

Как действует на заряженную частицу электрическое поле

Если заряженную частицу поместить в электрическое поле, на нее будет действовать сила, пропорциональная заряду. Для положительно заряженной частицы (иона) эта сила направлена в ту же сторону, что и электрическое поле. А для отрицательно заряженной (электрона) — в противоположную сторону. Под действием этой силы частица начнет ускоряться. Поэтому, если в электрическое поле поместить смесь положительно и отрицательно заряженных частиц (плазму), частицы разного знака полетят в противоположные стороны — в плазме возникнет электрический ток.

... и магнитное

В магнитном поле все гораздо сложнее. Сила, действующая на заряженную частицу, движущуюся в магнитном поле (сила Лоренца), направлена перпендикулярно и к направлению магнитного поля, и к направлению скорости частицы. Поэтому характер движения частицы зависит еще и от направления ее скорости по отношению к магнитному полю. Если частица летит вдоль магнитного поля, то поле на нее никак не действует. А если скорость частицы перпендикулярна к магнитному полю, тогда сила Лоренца заставляет частицу двигаться по окружности. В общем случае, когда скорость частицы направлена под углом к магнитному полю, частица будет двигаться по спирали, т. е. вращаться по окружности и од-

современно перемещаться вдоль поля (рис. 1.4). Радиус этой окружности зависит от индукции магнитного поля B , массы частицы m , ее заряда q и составляющей скорости частицы v_{\perp} : $r = mv_{\perp}/qB$.

Вращение заряженных частиц в магнитном поле открыл в 1895 г. английский ученый Дж. Лармор. В честь него это вращение часто называют ларморовским вращением, а радиус окружности — ларморовским радиусом. Вращение заряженных частиц в магнитном поле используется в ускорителях — циклотронах. В этих устройствах частица на каждом обороте проходит между электродами, где в этот момент возбуждают ускоряющее электрическое поле. Частота вращения частицы $\omega = v/r = qB/m$ от скорости частицы не зависит. Это удачное обстоятельство сильно упрощает управление циклотроном. Частоту $\omega = qB/m$ называют циклотронной частотой.

Вращение частиц точно по окружности происходит только, если индукция магнитного поля всюду внутри орбиты одинакова (поле однородно) и если на частицу не действуют никакие другие силы, кроме силы Лоренца. Если магнитное поле неоднородно, ларморовский радиус во время вращения частицы изменяется и траектория частицы перестает быть окружностью. Пусть, например, индукция магнитного поля, направленного от нас, возрастает справа налево (рис. 1.5). Тогда ларморовский радиус справа от центра будет больше, чем слева. В результате окружность не замкнется, и частица при каждом обороте будет смещаться по вертикали. Такое постепенное смещение называется дрейфом. Так как положительно и отрицательно заряженные частицы вращаются в противоположные стороны, направления дрейфа ионов и электронов противоположны. Положительно заряженные ионы в нашем примере будут дрейфовать вверх, а электроны — вниз.

Дрейфовое движение получается и в однородном магнитном поле, если имеется еще и электрическое поле,

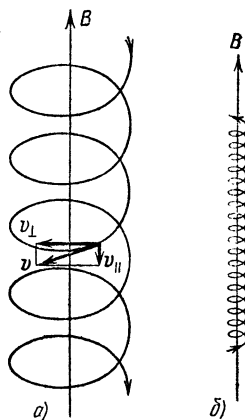


Рис. 1.4. Винтовые траектории заряженных частиц в однородном магнитном поле: а) траектория иона; б) траектория электрона.

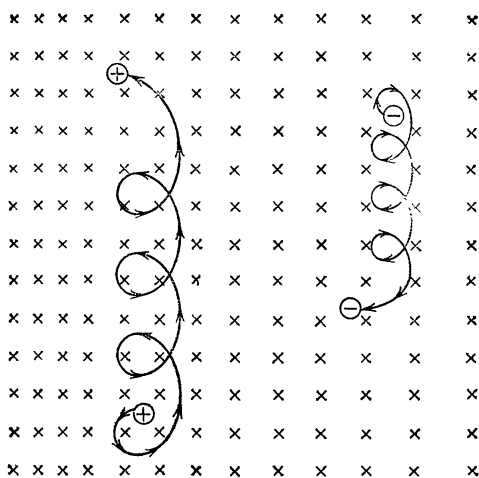


Рис. 1.5. Дрейф заряженных частиц в неоднородном магнитном поле.

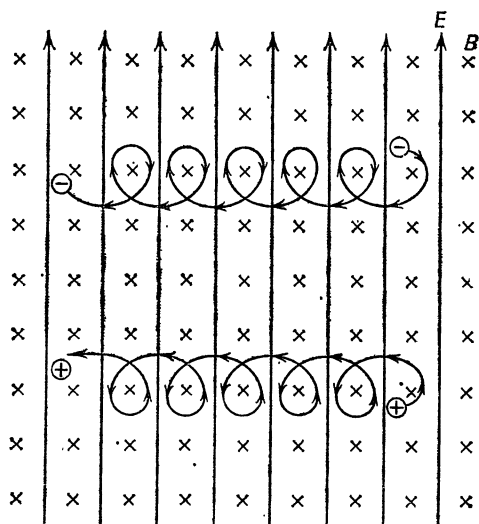


Рис. 1.6. Дрейф заряженных частиц в скрещенных электрическом и магнитном полях.

направленное перпендикулярно к магнитному. В этом случае изменение ларморовского радиуса происходит из-за того, что за счет работы электрических сил скорость частицы увеличивается на одних участках ее траектории и замедляется на других. Пусть, например, магнитное поле направлено от нас, а электрическое — вверх (рис. 1.6), тогда скорость положительно заряженной частицы в верхней половине траектории будет больше, чем в нижней. Соответственно изменяется и ларморовский радиус. В результате частица будет дрейфовать влево. У отрицательно заряженной частицы скорость будет наоборот больше в нижней части траектории. Но так как и вращение отрицательно заряженной частицы происходит в противоположную сторону, направление дрейфа получается для нее таким же, как и для частицы, заряженной положительно. Таким образом, в скрещенных электрическом и магнитном полях дрейф всех частиц (и электронов, и ионов) происходит в одну и ту же сторону.

Коллективные движения частиц плазмы

Как видите, движение заряженных частиц может быть довольно сложным. Но это еще что! Отдельные заряженные частицы — это еще не плазма. Плазма начинается тогда, когда частицы начинают двигаться коллективно. Взаимодействие заряженных частиц по закону Кулона приводит к тому, что движение каждой частицы сказывается на движении других частиц. Коллективные свойства плазмы проявляются прежде всего в ее квазинейтральности (квази — значит «как бы»). Хотя плазма состоит из заряженных частиц, число отрицательных частиц в ней обычно равно числу положительных и в целом плазма электрически нейтральна. Квазинейтральность плазмы выполняется с высокой точностью. Если в каком-то месте квазинейтральность случайно нарушается, скажем, часть электронов переместилась, так что в этом месте возник избыток ионов, а в соседнем месте — избыток электронов, в плазме возникает сильное электрическое поле, которое быстро вернет электроны обратно. В горячей плазме в результате теплового движения квазинейтральность то и дело нарушается и тут же восстанавливается. Так как электроны гораздо легче ионов, нарушение и восстановление равенства плотностей электронов и ионов происходит в основном за счет движения электронов, которые быстро колеблются около почти не-

подвижных ионов. Эти колебания настолько характерны для плазмы, что их называют плазменными колебаниями или же, по имени открывшего их основоположника физики плазмы Ленгмюра, — ленгмюровскими колебаниями. Ленгмюр нашел формулу для частоты этих колебаний $\omega = 56\sqrt{n} \text{ с}^{-1}$, которая так и называется ленгмюровской частотой. Кроме колебаний с ленгмюровской частотой, в плазме возможно еще и множество других колебаний. Например в ней так же, как и в любом газе, могут распространяться звуковые волны. В магнитном поле в плазме получает возможность распространяться еще целый набор специфических волн

Кроме всевозможных колебаний, коллективные движения плазмы могут происходить и в виде потоков, наподобие движения газа или жидкости. При этом в плазме возникают собственные электрические и магнитные поля, которые, наряду с внешними электрическими и магнитными полями, влияют в свою очередь на движение плазмы. Вот эти коллективные свойства и делают проблему управления поведением плазмы такой сложной.

Идея магнитного удержания

Теперь мы достаточно подготовлены, чтобы понять, каким образом можно удерживать горячую плазму магнитным полем. При температуре 10^8 К , которую нужно получить в термоядерном реакторе, скорость ионов дейтерия будет около 10^6 м/с , а электронов — $6 \cdot 10^7 \text{ м/с}$. Если эти частицы поместить в магнитное поле с индукцией в 1 Тл, радиус ларморовской окружности будет для ионов дейтерия около 2 см, а для электронов — 0,03 см. Так что наложение магнитного поля позволяет ограничить движение отдельных частиц этими пределами и таким образом изолировать их от стенок реактора.

Удержание отдельных частиц с помощью магнитного поля очень хорошо отработано при создании ускорителей заряженных частиц. В современных ускорителях частицы удерживаются в магнитном поле синхрофазотрона на протяжении многих миллионов оборотов. Поэтому, если бы речь шла только об удержании отдельных заряженных частиц, термоядерный реактор можно было бы создать довольно просто. Но нам нужно удерживать не отдельные заряженные частицы, а плазму, и это существенно меняет дело.

Заряженные частицы, из которых состоит плазма, вращаясь в магнитном поле по окружности, создают свое собственное магнитное поле. Оно направлено в сторону, противоположную внешнему магнитному полю. Поэтому, когда плазма находится в магнитном поле, индукция поля в области, занятой плазмой, уменьшается. Это явление называется диамагнетизмом. Явление диамагнетизма можно объяснить еще и так: вращение заряженной частицы по окружности эквивалентно текущему по этой окружности электрическому току. Внутри плазмы эти токи от соседних частиц взаимно компенсируются. А на границе плазмы такой компенсации не происходит (рис. 1.7). Получается, что по поверхности плазмы течет электрический ток. За счет магнитного поля этого

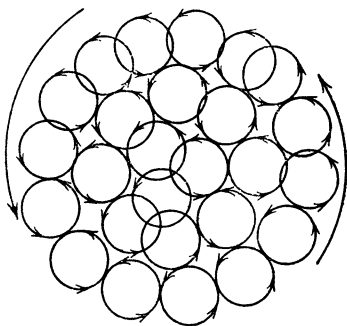


Рис. 1.7. Возникновение диамагнитного тока при удержании плазмы в магнитном поле.

тока и происходит уменьшение внешнего магнитного поля в области, занятой плазмой. Сила диамагнитного тока растет с увеличением температуры плазмы и ее плотности. При этом магнитное поле внутри плазмы ослабляется. Максимальной силы диамагнитный ток достигает, когда магнитное поле внутри плазмы исчезает совсем. После этого увеличение плотности и температуры плазмы уже не приводит к росту диамагнитного тока.

Как и на всякий проводник с током в магнитном поле, на плазму действует сила. Поскольку диамагнитный ток течет по поверхности плазмы, эта сила приложена к поверхности плазмы и направлена со стороны внешнего магнитного поля внутрь плазмы, где магнитное поле слабее. Можно сказать, что магнитное поле оказывает давление на поверхность плазмы. Вот это давление и можно использовать для удержания плазмы в магнитном поле. Максимального значения это давление достигает при максимальной силе диамагнитного тока, когда поле внутри плазмы падает до нуля. Если индукция внешнего магнитного поля равна B , то давление со стороны этого поля на поверхность плазмы будет $P_B = \frac{10^7}{8\pi} B^2$.

Если диамагнетизм плазмы недостаточно велик, чтобы полностью вытеснить поле, так что внутри плазмы остается магнитное поле с индукцией B_1 , давление будет определяться разностью давлений магнитного поля по обе стороны границы

$$P_B = \frac{10^7}{8\pi} (B^2 - B_1^2).$$

Давление самой плазмы, как и обычного газа, равно nkT . Таким образом, на границе плазмы с одной стороны действует давление внешнего магнитного поля P_B , а с другой — сумма давлений плазмы и магнитного поля внутри нее $nkT + \frac{10^7}{8\pi} B^2$. Если они равны друг другу, граница плазмы будет находиться в равновесии:

$$nkT + \frac{10^7}{8\pi} B_1^2 = \frac{10^7}{8\pi} B^2.$$

Эта формула выражает основную идею удержания плазмы магнитным полем, из которой видно, что в магнитном удержании плазмы важную роль играет отношение давления плазмы к давлению магнитного поля. Эта величина обозначается греческой буквой β и равна

$$\beta = \frac{8\pi nkT}{10^7 B^2}.$$

Поделив последнее уравнение на $\frac{10^7}{8\pi} B^2$, можно записать уравнение равновесия плазмы в магнитном поле так:

$$\beta + \frac{B_1^2}{B^2} = 1 \quad \text{или} \quad \beta = 1 - \frac{B_1^2}{B^2}.$$

С точки зрения экономичности работы термоядерного реактора величину β желательно иметь побольше, чтобы свести к минимуму затраты на создание сильного магнитного поля. Но чем больше β , тем труднее обеспечить удержание плазмы, потому что, когда давление плазмы сравнимо с давлением магнитного поля, движение плазмы существенно сказывается на структуре магнитного поля и, как правило, не в благоприятную для удержания плазмы сторону. Удержание плазмы магнитным полем возможно, если $\beta < 1$. В противном случае давление плазмы превышает давление магнитного поля и плазму удержать не удастся.

Насколько велико давление магнитного поля? Оно, как мы видели, зависит от индукции магнитного поля B .

В настоящее время в лаборатории получены магнитные поля с индукцией до 200 Тл, но такие поля создаются на миллионные доли секунды, причем установка, как правило, разрушается. Ясно, что стационарно работающий термоядерный реактор в таких условиях создать трудно. Индукцию магнитного поля в стационарно работающих установках в настоящее время можно получить до 25 Тл. Такие магниты делаются из сверхпроводников, так что однажды создав магнитное поле, его можно сохранять неопределенно долго. Единственный недостаток таких магнитов — их нужно охлаждать до температуры ~ 20 К, а это стоит довольно дорого. Кроме того, сверхпроводимость разрушается при $B \approx 12$ Тл, поэтому индукция магнитного поля должна быть всюду меньше этого критического значения. При конструировании реальных устройств для магнитного удержания плазмы обычно получается, что индукция магнитного поля в той области, где находится плазма, меньше, чем на самой катушке, создающей магнитное поле. Поэтому индукция магнитного поля, которую можно использовать для удержания плазмы, что-то около 5 Тл.

При такой индукции магнитное поле создает давление $P_B = \frac{10^7}{8\pi} \cdot 25 = 10^7$ Па (это около 100 атм). И, значит, давление плазмы, которую можно удержать таким магнитным полем, не должно превышать этого значения. При температуре 10^8 К давление 10^7 Па будет иметь плазма с плотностью $6 \cdot 10^{21}$ м $^{-3}$. Так как плазма состоит из электронов и ионов, то это значит, что в одном кубическом метре должно быть не больше $3 \cdot 10^{21}$ электронов и $3 \cdot 10^{21}$ ионов.

В соответствии с критерием Лоусона $n\tau_E \geq 2 \cdot 10^{20}$ с/м 3 , чтобы работа термоядерного реактора была энергетически выгодна, время удержания плазмы с плотностью ионов $3 \cdot 10^{21}$ м $^{-3}$ должно быть не меньше 0,1 с.

Учитывая однако, что удержание плазмы при $\beta \approx 1$ осуществить очень трудно, лучше принять с некоторым запасом $\beta \approx 0,1$. Тогда плотность ионов плазмы в реакторе с магнитным удержанием будет $3 \cdot 10^{20}$ м $^{-3}$ и, значит, время удержания нужно довести примерно до 1 с. Вспомним теперь, что в критерии Лоусона речь идет не просто о времени удержания плазмы, а о времени удержания энергии в плазме. Конечно, если мы не сможем удержать саму плазму, то она уйдет на стенку вместе со своей энергией. Таким образом, время удержания энергии никак не мо-

жет быть больше, чем время удержания частиц плазмы. Но может быть гораздо меньше! Потому что существует еще такое явление, как теплопроводность. В куске меди, например, атомы прекрасно удерживаются в узлах кристаллической решетки. Тем не менее, если нагреть кусок меди, а потом погрузить его одним концом в холодную воду, весь кусок довольно быстро остынет. Время остывания зависит от размеров тела, его теплопроводности, плотности и теплоемкости. Теплопроводность κ , плотность ρ и теплоемкость C входят в формулы для скорости переноса тепла всегда в виде комбинации $\kappa/\rho C$. Поэтому для удобства расчета в физике часто используется коэффициент переноса тепла χ , равный отношению теплопроводности к плотности и теплоемкости $\chi = \kappa/\rho C$ [м²/с]. Если коэффициент переноса тепла известен, время остывания тела размером a вычислим по формуле: $\tau_E \approx a^2/4\chi$.

Перенос тепла при теплопроводности происходит в результате соударения частиц, из которых состоит тело, между собой. Поэтому коэффициент переноса тепла χ зависит от величины перемещения отдельных частиц l и времени между их соударениями τ : $\chi = l^2/\tau$. В твердых телах, вроде меди, l — это амплитуда колебаний атомов, а в газах l — это длина свободного пробега молекул. В плазме, в отсутствии магнитного поля, перенос тепла происходит почти так же, как в газе. Длина свободного пробега частиц зависит от температуры и плотности плазмы: $l = 3 \cdot 10^8 T^2/n$. В условиях термоядерного реактора ($n \approx 3 \cdot 10^{20}$ м⁻³, $T \approx 10^8$ К) она получается очень большой: $l \approx 9 \cdot 10^3$ м. Время между соударениями ионов в этих условиях $\tau \approx 6 \cdot 10^{-3}$ с. Так что в термоядерной плазме коэффициент переноса тепла получается очень большим $\chi \approx 10^{10}$ м²/с, а время переноса тепла получается, соответственно, очень маленьким. При таком коэффициенте переноса тепла выполнить критерий Лоусона не удастся. Если даже сделать реактор с плазмой размером в километр, время удержания тепла в нем получится всего лишь $\tau_E \approx 2 \cdot 10^{-5}$ с. Нужно искать способы для снижения теплопроводности плазмы. К счастью, такой способ далеко искать не надо — это опять-таки магнитное поле. В магнитном поле частицы плазмы двигаются по окружности, и значит, при каждом соударении тепло переносится теперь не на длину свободного пробега, составляющей тысячи метров, а на расстояние порядка радиуса этой окружности, который для ионов в термоядерной плазме порядка сантиметра. Поэтому коэффициент переноса теп-

ла для плазмы, находящейся в магнитном поле, получается во много раз меньше, чем без магнитного поля. Его можно подсчитать по формуле $\chi = 2 \cdot 10^{-18} n / B^2 \sqrt{T}$. При плотности плазмы $n \approx 3 \cdot 10^{20} \text{ м}^{-3}$ и температуре $T \approx 10^8 \text{ К}$ получается $\chi \approx 6 \cdot 10^{-2} \text{ м}^2/\text{с}$ уже при $B = 1 \text{ Тл}$. При таком значении коэффициента переноса тепла нужное время $\tau_E \approx 1 \text{ с}$ получается для реактора с размером плазмы около одного метра. Так что с теплопроводностью с помощью магнитного поля тоже как будто можно справиться. Правда, для плазмы в магнитном поле снижение теплопроводности происходит только в направлении поперек магнитного поля, а вдоль магнитного поля перенос тепла происходит с прежней огромной скоростью и это надо все время иметь в виду при создании конструкции реактора.

Такой представлялась идея магнитного удержания, когда ее одновременно и независимо высказали в 1950 г. ученые в Советском Союзе и в США. Оценки, сделанные в этих классических работах, оставляли впечатление, что добиться с помощью магнитного поля длительного удержания плазмы и в достаточной степени снизить ее теплопроводность не так уж трудно. Поэтому начало работ по термоядерной проблеме проходило в обстановке всеобщего оптимизма и веры в быстрый успех.

ГЛАВА II

САМОСЖИМАЮЩИЕСЯ РАЗРЯДЫ

Пусть плазма держит себя сама!

Как же создать магнитное поле для удержания плазмы? Проще всего это сделать с помощью электрического тока, текущего прямо по плазме. В этом случае линии индукции магнитного поля будут иметь форму колец, охватывающих плазменный шнур. Если поместить этот плазменный шнур в трубу, движение частиц плазмы вдоль поля не будет иметь никакого значения, а чтобы добраться до стенок трубы, частицам плазмы придется двигаться поперек магнитного поля, так что магнитное поле надежно изолирует плазму от стенок. Именно то, что нужно! Кроме того, так как плазма имеет заметное электрическое сопротивление, ток, текущий по плазме, будет нагревать ее так же, как он нагревает, например, спираль в электроплитке. Чем сильнее ток, тем

сильнее нагревается плазма. Одновременно возрастает и давление магнитного поля, удерживающего плазму. При достаточно большом токе давление магнитного поля может превысить давление плазмы, и шнур начнет сжиматься. Сжатие приведет к еще большему нагреву плазмы.

Получается очень здорово — плазма сама себя греет и сама себя держит! Эта замечательная идея, родившаяся независимо и одновременно по обе стороны океана в начале 50-х годов, вызвала бурный энтузиазм исследователей. Простейшие расчеты показали, что плазму можно нагреть до термоядерной температуры в 100 миллионов градусов при силе тока около миллиона ампер. И работа закипела. В кратчайший срок за один-два года были созданы установки, способные пропускать через плазму токи в 100—200 кА, а потом и в 2—4 миллиона ампер!

В это время не были еще изобретены многие приборы, с помощью которых сейчас проводятся исследования плазмы. Экспериментаторы располагали только простейшими приборами для измерения тока и индукции магнитного поля. Единственным прибором для наблюдения за самой плазмой была кинокамера, хотя плазма, во всяком случае та плазма, которую стремились получить экспериментаторы, должна была быть невидимой. Ведь разряд проводился в дейтерии, а при образовании плазмы единственный электрон отрывается от атома и остается голое ядро дейтерия, которое излучать свет в видимой области не может. Дейтериевая плазма может светиться разве что в рентгеновских лучах. Тем не менее уже в первых опытах было обнаружено, что вопреки ожиданиям, плазма светится в видимом свете и даже очень ярко. Поэтому в дальнейших опытах для изучения поведения плазмы широко применялись фотографические и спектральные методы. Ну и, конечно, чтобы зарегистрировать термоядерные реакции в плазме, если удастся достичь необходимых для этого условий, рядом с установкой находился счетчик нейтронов.

Сам опыт проходил так. Стеклопаянная или керамическая труба с двумя металлическими электродами на концах откачивалась до высокого вакуума и заполнялась водородом или, если экспериментаторы надеялись получить условия для термоядерных реакций, дейтерием. Большая батарея конденсаторов заряжалась до напряжения в несколько десятков тысяч, а иногда и до ста тысяч вольт. При замыкании батареи на металлические электроды раздавался страшный грохот, как во время грозы,

а внутри трубы вспыхивал ослепительным светом разряд. Довольно быстро после начала экспериментов пришел первый успех.

Есть сжатие!

Для наблюдения за поведением плазмы использовали сверхскоростную кинокамеру, позволяющую снимать два миллиона кадров в секунду. На рис. 2.1 показана последовательность кадров, снятых такой кинокамерой. Видно, как постепенно развивается

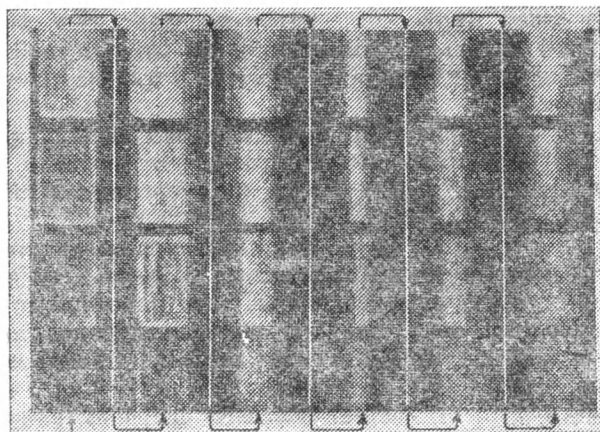


Рис. 2.1. Кадры скоростной киносъемки разряда. Последовательность кадров показана стрелками.

разряд, плазма начинает светиться все ярче и ярче. Область свечения отрывается от стенок трубы и начинает сжиматься. Она становится все уже и уже, а потом снова начинает расширяться.

Минимальный диаметр плазменного шнура примерно в 10 раз меньше, чем в начале разряда, когда плазма заполняла почти все пространство внутри вакуумной камеры.

Есть нейтроны!

В момент наибольшего сжатия плазмы нейтронный детектор, расположенный рядом с установкой, зарегистрировал импульс нейтронов. Значит, термоядерные реакции в разряде идут. Ура! Взрыв энтузиазма,

вызванный появлением этих нейтронов, хорошо показан в фильме «Девять дней одного года». Только в отличие от фильма, где нейтроны вызвали у героя фильма лучевую болезнь, в реальной жизни нейтронов было едва достаточно, чтобы уверенно их зарегистрировать. Так что ни о какой лучевой болезни не могло быть и речи. И печальная судьба героя фильма связана только с тем, что искусство требует жертв.

Нейтроны в самосжатом разряде впервые были получены Н. В. Филипповым и В. И. Синициным в Институте атомной энергии имени И. В. Курчатова в 1952 г. и действительно вызвали взрыв энтузиазма. Однако физики, в силу своей профессии, — народ довольно скептический. Сразу же возникли сомнения, а те ли это нейтроны? А достигнуты ли в действительности в плазме термоядерные условия?

Чтобы это проверить первым делом измерили энергию нейтронов. Если эти нейтроны рождаются в термоядерной реакции $D+D \rightarrow {}^3\text{He}+n$, их энергия должна быть близка к 2,4 МэВ.

Результаты этих измерений оказались неожиданными: энергия нейтронов, вылетающих из разряда в ту же сторону, в которую течет по плазме электрический ток, оказалась больше, чем 2,4 МэВ. А те нейтроны, которые летят в противоположную току сторону, имеют энергию меньше, чем 2,4 МэВ. Это значит, что вступающие в реакцию ионы дейтерия имеют большую скорость, направленную в ту же сторону, куда течет электрический ток. И это очень печально потому, что это означает, что реакции, породившие нейтроны, строго говоря, нельзя называть термоядерными. Ведь термоядерные реакции должны происходить в результате теплового движения частиц, а в этом случае выделенного направления скорости не должно быть.

В том, что в разряде действительно возникают ускоренные ионы дейтерия, убедились, измерив энергию ионов, вылетающих из разряда. Для этого в электроде или боковой стенке разрядной трубки делалось небольшое отверстие. Вылетающие из отверстия ионы анализировались с помощью масс-спектрометра. Оказалось, что каким-то образом в разряде рождаются частицы с энергией в несколько сот тысяч электронвольт, хотя напряжение на разрядной трубке было во много раз меньше. Стало ясно, что рождение нейтронов происходит в результате реакций синтеза, вызываемых этими ускоренными ионами.

Но каким образом они ускоряются до такой большой энергии? Это был только один из целого ряда вопросов, которые возникли после первых опытов с самосжатыми разрядами. Одновременно с импульсом нейтронов возникает еще и мощный импульс рентгеновских лучей. Откуда они? Почему плазма так ярко светится?

Исследовали спектр этого свечения. Оказалось, что свет, испускаемый плазмой, состоит из линий кислорода, углерода, кремния. Это в водородной-то плазме? И вообще... плазма ведет себя как-то странно!

Когда описываемые опыты со самосжатыми разрядами только начинались, физикам рисовалась идиллическая картина сжатого магнитным полем плазменного шнура, по которому течет ток, создающий магнитное поле. Картина эта представлялась совершенно стационарной. Реальное поведение плазмы в эксперименте оказалось совершенно не таким. Вспомним кадры киносъемки (рис. 2.1). Шнур сжимается и снова расширяется, опять сжимается и опять расширяется... И все это за миллионные доли секунды! На стационарную картину совсем не похоже.

Было над чем поломать голову теоретикам!

Теоретики довольно быстро поняли причину такого поведения плазмы. Оказалось, что для удержания плазмы мало уравновесить давление плазмы давлением магнитного поля. Нужно еще, чтобы это равновесие было устойчивым.

Это значит, что если произойдет случайное отклонение границы плазмы от положения равновесия, весьма желательно, чтобы возникла сила, которая вернула бы ее обратно в положение равновесия. Иначе... иначе ничего не выйдет! Если сила вызовет еще большее отклонение от положения равновесия, плазма будет уходить все дальше и дальше и в конце концов коснется стенок и погибнет. Теоретики тут же придумали название для этого весьма нежелательного процесса — неустойчивость плазмы.

Слово это, вошедшее в обиход физиков-плазменщиков в начале 50-х годов, стало, увы, практически неизбежным при обсуждении всевозможных способов удержания плазмы. Теоретики наоткрывали буквально десятки разных видов неустойчивости. А вот придумать устройство для удержания плазмы, в котором были бы устранены все виды неустойчивости, пока еще не удалось никому.

В тех первых опытах с самосжатыми разрядами поведение плазмы определяла неустойчивость типа перетяжки. Впервые эта неустойчивость была разобрана в работе

Б. А. Трубникова. Он выяснил, что развитие этой неустойчивости происходило так. В какой-то момент толщина шнура в каком-нибудь месте оказывалась чуть меньше, чем в соседних. Магнитное поле тока обратно пропорционально радиусу r плазменного шнура: $B=2 \cdot 10^7 I/r$ и поэтому в том месте, где радиус r оказался меньше, величина магнитного поля стала больше, чем в соседних местах.

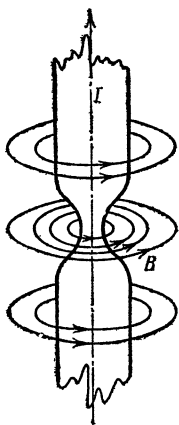


Рис. 2.2. Неустойчивость типа перетяжки. Повышенное давление магнитного поля в месте сужения тока разрывает плазменный шнур.

В результате возросло давление магнитного поля на плазму (рис. 2.2). Плазма начала перетекать в соседние участки. От этого радиус шнура еще больше уменьшается. Магнитное поле еще больше возрастает и еще сильнее сжимает шнур. И так далее... Очень быстро — за миллионные доли секунды — развивающаяся перетяжка полностью разрывает шнур. В момент разрыва тока по законам самоиндукции в области перетяжки возникает сильное электрическое поле, в котором происходит ускорение ионов дейтерия и электронов до энергии в сотни тысяч электронвольт. Этим

и объясняется появление импульсов нейтронов и рентгеновских лучей в момент наибольшего сжатия плазмы. При спаде тока его магнитное поле резко уменьшается, и плазма стремительно расширяется, ведь теперь ее ничто не удерживает. Когда плазма касается стенок вакуумной трубки, поверхностный слой стенки испаряется и атомы кремния, кислорода, углерода... всего, что только имеется на поверхности, попадает в плазму. Вот почему плазма так ярко светится. При каждой пульсации в плазму поступает все больше примесей. Приблизительно по той же схеме развивается и другая неустойчивость шнура с током — неустойчивость изгиба (рис. 2.3). Если плазменный шнур слегка изогнется, с внутренней стороны изгиба магнитное поле возрастает. Возрастает и магнитное давление. В результате шнур еще больше изгибается, пока не разорвется или не коснется стенки. Все это происходит очень быстро — за миллионные доли секунды — ведь плазма очень легкая, а силы, действующие на нее, велики. Теория сжа-

тия плазмы в шнуре с сильным током была развита в работах советских ученых М. А. Леонтовича и С. М. Осовца в 1953 г. Они рассчитали скорость и частоту пульсаций самосжатого разряда и даже момент появления нейтронного импульса и получили неплохое согласие расчетов

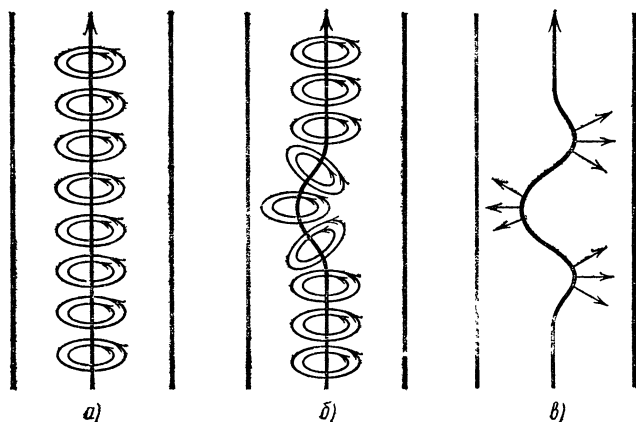


Рис. 2.3. Неустойчивость типа изгиба. Если на прямом плазменном шнуре с током (а) возникает изгиб (б), то возникает избыточное давление магнитного поля, способствующее увеличению этого изгиба (в).

с экспериментом. Само по себе это — замечательное достижение. Изучение самосжатых разрядов дало возможность сделать большой шаг в понимании физики плазмы. Только вот от достижения желанной цели — управляемого термоядерного синтеза — полученные результаты были очень далеки. В самых сильных разрядах в момент наибольшего сжатия была достигнута температура плазмы около одного миллиона градусов при плотности $n=10^{23}$ м⁻³. Плазма находилась в этом состоянии в течение времени $\tau=10^{-7}$ с. Значит, время удержания энергии не превышало этого значения и, следовательно, произведение $n\tau$ в этих опытах было $\leq 10^{16}$ с/м³ вместо заветных $n\tau=2 \cdot 10^{20}$ с/м³.

Тета-пинч

Наряду с обычными линейными самосжимающимися разрядами исследовалась и другая их разновидность, которую американские физики называли тета-пинчами. Слово «пинч» для обозначения разряда

сжимающегося под действием собственного магнитного поля предложил еще в 1937 г. американский физик Тонкс («пинч» — по-английски сжимать, прищемлять). Название тета-пинч родилось из картинки, где конфигурация тока и магнитного поля в разряде рассматривалась в цилиндрических координатах z , θ , r (рис. 2.4). В обычном линейном

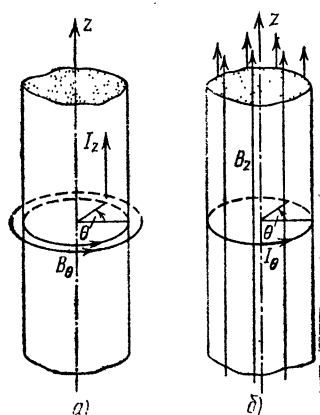


Рис. 2.4. Схема линейного пинч-эффекта (а) и процесс сжатия цилиндрического столба силами, действующими на него со стороны внешнего продольного поля (б).

разряде, о котором шла речь в предыдущем разделе, ток шел вдоль плазменного цилиндра по оси z , а магнитное поле этого тока было направлено вдоль окружности, по которой отсчитывается угол θ (тета) (рис. 2.4, а). Но можно поступить и иначе. Создать ток, текущий по окружности в направлении угла θ . Тогда возникнет магнитное поле этого тока, направленное по оси z (рис. 2.4, б). Чтобы различать эти два варианта самосжимающихся разрядов, американские физики назвали их зета-пинч и тета-пинч.

Если в прямом разряде ток в плазме можно было создавать, просто подавая достаточно высокое напряжение на электро-

ды, то в тета-пинче для создания тока в плазме используется эффект магнитной индукции. Разрядная трубка помещается внутрь одновитковой катушки, согнутой из толстой медной шины. При разряде на эту катушку конденсаторной батареи, заряженной до высокого напряжения, в катушке очень быстро, за миллионные доли секунды, возникает магнитное поле. По закону электромагнитной индукции быстрое изменение магнитного поля вызывает появление электрического поля. Вот это электрическое поле и создает в плазме сильный кольцевой ток. Дальнейшие события в тета-пинче развиваются в общем по тому же сценарию, что и в обычном линейном. Плазма сжимается магнитным полем тока в плотный сгусток кольцевой формы. Температура ее сильно возрастает, а при достаточно мощном разряде появляются и нейтроны. Поначалу американским физикам показалось, что тета-пинч не подвержен тем неустойчивостям, кото-

рые свойственны обычному линейному разряду. Эти надежды были основаны на том, что выход нейтронов в мощных тета-пинчах на установках «Сцилла» и «Сцилла-1» значительно превысил достижения линейных разрядов и достиг 10^7 – 10^8 нейтронов за импульс. Однако

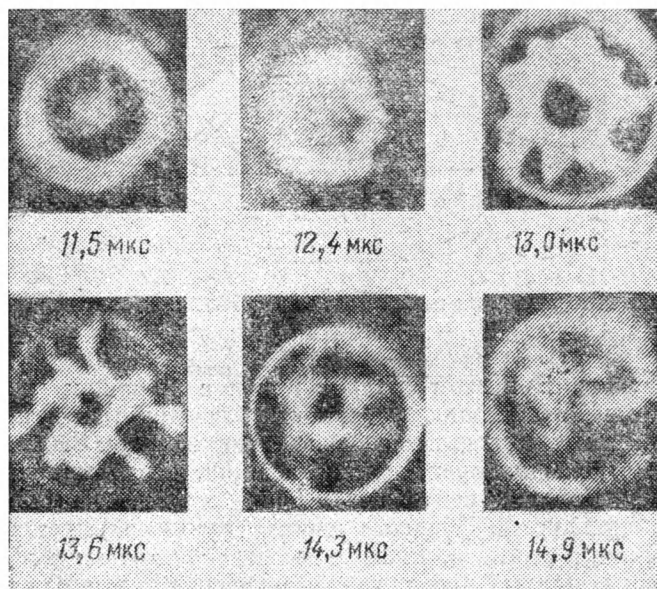


Рис. 2.5. Кинокадры развития неустойчивости тета-пинча.

дальнейшие исследования показали, что разряд в тета-пинче отнюдь не блещет устойчивостью. Особенно отчетливо это видно на снимках, полученных И. Ф. Кварцхавой и его сотрудниками в Сухумском физико-техническом институте. Позже такие же снимки были сделаны и в других лабораториях. Снимки сделаны через торец трубы вдоль оси катушки (рис. 2.5). На снимках четко видно, как в начале разряда образуется плазменное кольцо и начинает сжиматься. Но форма кольца вскоре становится весьма неровной — оно напоминает зубчатое колесо. Зубья этого колеса вытягиваются и вскоре достигают стенок вакуумной камеры. Форма плазмы становится все более беспорядочной и несимметричной. Появляется свечение плазмы вблизи поверхности вакуумной камеры и разряд гаснет. Причины такого поведения плазмы можно понять,

если посмотреть на конфигурацию магнитного поля в тета-пинче (рис. 2.6). Линии индукции охватывают ток, текущий по плазменному кольцу точно так же, как и в линейном разряде. Поэтому в тета-пинче имеются условия для развития тех же неустойчивостей, что и в обычном пинче. Видимые на снимках Кварцхавы «зубья» образуются в результате развития неустойчивостей типа

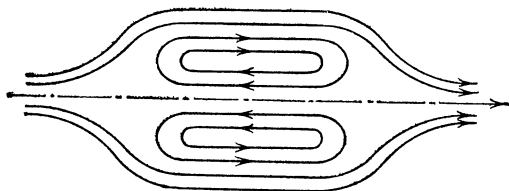


Рис. 2.6. Конфигурация магнитного поля тета-пинча в сжимающейся плазме.

перетяжки. При этом так же, как и в линейном пинче, в этих местах возникают мощные электрические поля, в которых происходит ускорение ионов плазмы. Эти ускоренные ионы и порождают те реакции, в результате которых рождаются нейтроны.

Американские физики проявили завидное упорство в развитии тета-пинча. Эксперименты с различными вариантами «Сциллы» продолжались в течение почти 20 лет — до конца 70-х годов. Непрерывно наращивая размеры установок и энергетическую мощность системы питания, они надеялись достичь в тета-пинче термоядерных условий, несмотря на свойственные ему недостатки. И им это почти удалось. Последний вариант установки, названный «Сциллак» имел длину 8 м. Он представлял собой отрезок трубы, изогнутый в виде дуги 120° . В дальнейшем предполагалось дополнить его до полного круга еще двумя такими же отрезками, чтобы исключить потери плазмы на концах трубы. При этом получалась плазма с плотностью $2 \cdot 10^{22} \text{ м}^{-3}$ и температурой ионов, вычисленной по выходу нейтронов, $(2-3) \cdot 10^7 \text{ К}$. Но время удержания плазмы, несмотря на внушительные размеры установки, не превышало $2 \cdot 10^{-5} \text{ с}$. Так что произведение $n\tau$ в этих опытах не превышало $4 \cdot 10^{17} \text{ с/м}^3$. Такое малое время удержания было связано с неустойчивостями. Борьба с ними оказалась очень сложной, и в конце 70-х годов опыты по программе «Сциллак» не выдержали конкурен-

ции с другими направлениями исследований по программе УТС и были прекращены. Но опыты с прямыми, не замкнутыми в круг тета-пинчами продолжаются до сих пор. Уж больно просто получается в этих установках почти термоядерная температура — быстрый разряд конденсаторной батареи и готово! Основная проблема в этих установках — увеличение времени удержания плазмы.

Плазменный фокус

В ходе экспериментов со самосжатыми разрядами советский ученый Н. В. Филиппов открыл одну их разновидностей, которая дожила до наших дней и, более того, остается одним из возможных реальных вариантов решения термоядерной проблемы. Открытие Н. В. Филиппова было сделано в начале 50-х годов в самый разгар опытов со самосжатыми разрядами. Когда было выяснено, что один из основных путей потери энергии в этих разрядах связан с излучением примесей, академик Л. А. Арцимович предложил заменить фарфоровую стенку разрядной камеры на медную. Предполагалось, что высокая теплопроводность меди уменьшит разогрев поверхности при соприкосновении с плазмой и поток примесей, поступающих в плазму, уменьшится. Исходя из соображений электробезопасности, медную боковую стенку камеры соединили электрически с катодом. В результате образовалась конфигурация, показанная на рис. 2.7. При подаче на анод импульса высокого напряжения в камере загорался разряд. Экспериментаторы были поражены удивительным эффектом — замена материала боковой стенки привела к резкому увеличению выхода нейтронов. Причем, в отличие от обычного разряда, в этой установке нейтронный импульс стал получаться стабильно, в каждом выстреле. Н. В. Филиппов с помощью свинцовых коллиматоров с маленьким отверстием и нейтронным счетчиком внутри нашел источник нейтронов. Им оказалась удивительно маленькая (доли сантиметра) область на оси между анодом и катодом. Оказывается, в ходе развития разряда в этой установке под давлением магнитного поля плазма устремляется со всех сторон к центру системы. В точке, лежащей на оси симметрии, потоки плазмы сталкиваются и образуется плотный плазменный сгусток, из которого и идут нейтроны.

Эту область, а по ней и всю установку, стали называть «плазменным фокусом» (рис. 2.7). Струи плазмы

собираются в точке на оси подобно тому, как собираются потоки света в фокусе линзы.

Исследование процессов, происходящих в разряде типа плазменного фокуса, очень сложная задача. Все события разыгрываются в небольшом по размеру пространстве и очень быстро. Время здесь измеряется миллиардными долями секунды.

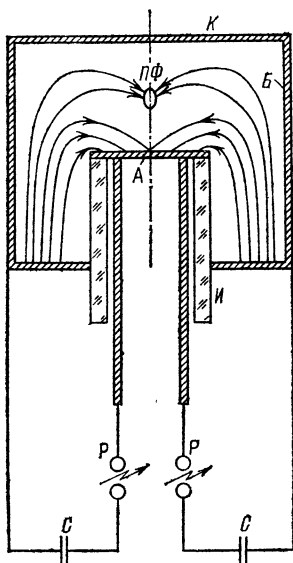


Рис. 2.7. Схема установки «Плазменный фокус». А — анод, К — катод, Б — боковая стенка, И — изолятор, С — батарея конденсаторов, Р — разрядник, ПФ — место образования сгустка плазмы, собственно плазменный фокус.

Время удержания энергии в плазменном фокусе не превышает 10^{-8} – 10^{-7} с. Плотность плазмы в этот момент 10^{23} – 10^{24} м⁻³. Так что получается произведение $nt \approx 10^{16}$ с/м³.

Увеличение времени удержания плазмы возможно взамен наращивания мощности и энергии источника питания.

С увеличением вкладываемой энергии выход нейтронов растет очень быстро. Поэтому возможно использование плазменного фокуса в качестве источника нейтронов в гибридном термоядерном реакторе. Нейтроны в нем бу-

Так же как в обычном самосжатом разряде, в плазменном фокусе тоже развивается неустойчивость, образуются потоки ускоренных частиц. Но плотность плазмы здесь настолько велика, что ускоренные частицы отдают свою энергию плазме и нагревают ее. Если мощность батареи, питающей разряд, достаточно велика, температура плазмы в плазменном фокусе может достигать десятков миллионов градусов. В некоторых опытах получается даже сто миллионов градусов. При этом термоядерные реакции идут с большой интенсивностью и поток нейтронов достигает большого значения — до 10^{12} нейтронов за импульс.

Единственный параметр, из-за которого плазменный фокус не стал пока что основой термоядерного реактора, это время удержания плазмы. Время удержания энергии в плазмен-

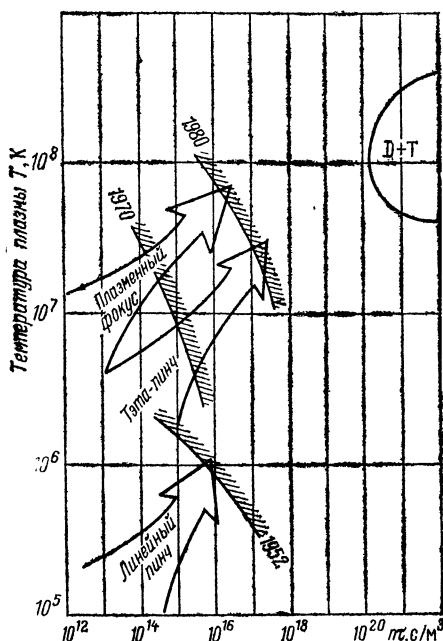


Рис. 2.8. Карта поля боя.

дут использоваться для того, чтобы вызвать деление ядер урана в окружающей плазменный фокус оболочке. Но об этом подробнее будет сказано в гл. XI.

Карта поля боя

Чтобы наглядно представить себе состояние, которое надо пройти от результатов первых опытов до термоядерного реактора, воспользуемся диаграммой, где по одной оси отложена температура плазмы T , а по другой — то самое произведение плотности плазмы на время удержания $n\tau$. От этой величины зависит, быть или не быть термоядерному реактору (рис. 2.8).

На этой диаграмме заветная область управляемых термоядерных реакций $T \approx 100$ миллионов градусов и $n\tau \approx 2 \cdot 10^{20}$ с/м³ расположена в верхнем правом углу. Результаты исследований самосжатых разрядов располагаются внизу слева ($T \approx 10^6$ К, $n\tau \approx 10^{16}$ с/м³). До «термоядерной крепости», как говорится, «дистанция огромного размера» — нужно в 100 раз поднять температуру и в 10 000 раз увеличить время удержания.

В плазменном фокусе получена очень высокая температура $T \approx 6 \cdot 10^7$ К, но довольно скромные результаты по времени удержания $nt \approx 3 \cdot 10^{16}$ с/м³. От наивысших достижений тета-пинчей ($T \approx 3 \cdot 10^7$ К, $nt \approx 2 \cdot 10^{17}$ с/м³) до «термоядерной крепости» тоже еще довольно далеко.

Исследования самосжатых разрядов, хотя и не привели непосредственно к достижению термоядерных условий, сыграли важную роль в становлении физики плазмы. В ходе этих экспериментов были разработаны многие методы исследования плазмы. Возникло некоторое понимание поведения плазмы и ее взаимодействия с магнитными полями.

ГЛАВА III

МАГНИТНЫЕ ЛОВУШКИ

Неустойчивость плазмы, обнаруженная в опытах с самосжимающимися разрядами, заставила искать другие способы удержания плазмы с помощью магнитных полей. В 1952 г. Г. И. Будкер в Советском

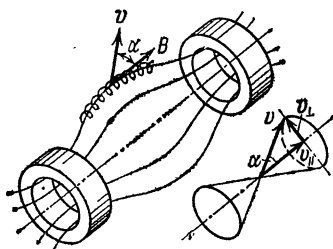


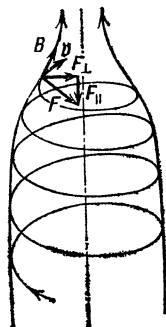
Рис. 3.1. Схема ловушки с магнитными пробками. Если скорость частицы в средней части ловушки составляет достаточно большой угол с направлением магнитного поля, частица отражается от магнитных пробок и удерживается в ловушке. Если этот угол слишком мал, частица попадает в «конус потерь» и покидает ловушку.

Союзе и, как потом выяснилось, независимо от него Йорк и Пост в США изобрели ловушку, где для длительного удержания плазмы используется явление отражения заряженных частиц от области с повышенной индукцией магнитного поля.

Конструкция простейшей ловушки такого типа показана на рис. 3.1. Она представляет собой просто две рядом расположенные катушки для создания магнитного поля. Конфигурация линий магнитной индукции в такой ловушке напоминает бутылку с двумя горлышками. Индукция магнитного поля в горлышках больше, чем в середине ловушки. Эта повышенная индукция и создает

магнитную «пробку», препятствующую уходу плазмы из ловушки. Поэтому Г. И. Будкер назвал свою конструкцию ловушкой с «магнитными пробками» или короче «пробокотрон». Американцы назвали точно такую же ловушку — «системой с магнитными зеркалами». Принцип работы

Рис. 3.2. При приближении частицы к пробке у силы Лоренца появляется составляющая $F_{||}$, которая тормозит движение частицы вдоль оси и возвращает ее обратно к центру ловушки



такой ловушки заключается в следующем. Если частица одновременно имеет составляющие скорости $v_{||}$ вдоль магнитного поля и v_{\perp} перпендикулярно к нему, она одновременно вращается по окружности радиусом $r = mv_{\perp}/qB$ и движется вдоль линии магнитной индукции со скоростью $v_{||}$. В результате, траектория имеет вид спирали. При приближении к пробкам магнитная индукция возрастает, а силовые линии поля сближаются. Тогда, как видно из рис. 3.2, у силы Лоренца, которая всегда перпендикулярна силовой линии и скорости частицы, появляется составляющая вдоль оси ловушки, тормозящая частицу. Продольная скорость частицы начинает уменьшаться. Полная энергия $W = (mv_{||}^2 + mv_{\perp}^2)/2$ при этом, естественно, сохраняется. Уменьшение продольной скорости $v_{||}$ компенсируется одновременным увеличением v_{\perp} . Частица все быстрее вращается и все медленнее движется вдоль оси ловушки. Внешне это выглядит так, что шаг спирали уменьшается. Спираль становится похожа на все более и более сжатую пружину. Наконец, скорость $v_{||}$ становится равной нулю, а затем начинается движение в противоположную сторону — от пробки к центру ловушки.

В процессе отражения от пробки перераспределение энергии между продольным и поперечным движением происходит таким образом, что отношение поперечной энергии $W_{\perp} = mv_{\perp}^2/2$ к магнитной индукции B сохраняется неизменным.

Отношение W_{\perp}/B называется адиабатическим инвариантом. Инвариантом оно называется потому, что остается при движении частицы неизменным, несмотря на изменение B . А адиабатическим оно называется потому, что эта инвариантность выполняется только при условии, что величина B изменяется достаточно плавно. Для сохранения адиабатического инварианта нужно, чтобы частица совершила много оборотов, прежде чем она попадет в область с существенно изменившейся магнитной индукцией B . Обычно размеры такой магнитной ловушки значительно больше радиуса ларморовского кружка, так что это условие выполняется с большим запасом, и сохранение адиабатического инварианта соблюдается с большой точностью. Таким образом, частица оказывается запертой внутри ловушки и может совершать колебания между двумя пробками неопределенно долго.

К сожалению, это верно не для всех частиц. Представим себе случай, когда скорость частицы в основном направлена вдоль линии магнитной индукции, так что, когда частица находится в середине ловушки, почти вся ее энергия сосредоточена в продольной компоненте, а энергия поперечного движения W_{\perp} невелика. При приближении к пробке энергия W_{\perp} возрастет пропорционально росту индукции B . Если, например, в центре ловушки величина B была равна B_0 , а максимальное значение индукции в пробке равно B_{\max} , значение W_{\perp} возрастет до $W_{\perp\max} = W_{\perp B_{\max}}/B_0$. При этом величина энергии продольного движения упадет. Но может случиться так, что, когда частица дойдет до точки с максимальной магнитной индукцией, значение продольной энергии, а значит и продольной скорости, не упадет до нуля. Тогда остановки частицы не произойдет и она вылетит из ловушки сквозь пробку. Нетрудно вычислить, что такая неприятность ожидается все частицы, направление скорости которых составляет с направлением линии магнитной индукции угол меньше чем $\alpha_{\text{крит}}$, такой, что $\sin \alpha_{\text{крит}} = \sqrt{B_0/B_{\max}}$. Если, например, B_{\max} превышает B_0 в 4 раза, $\sin \alpha_{\text{крит}} = 1/2$ и $\alpha_{\text{крит}} = 30^\circ$. В этом случае все частицы, скорости которых лежат внутри конуса с углом 30° вокруг линии магнитной индукции, будут потеряны.

Существование конуса потерь — один из основных недостатков ловушки с магнитными пробками. Так как при каждом столкновении частиц между собой имеется шанс, что направление скорости частицы после столкновения попадет в конус потерь, время удержания частиц в ло-

вuwшке с магнитными пробками получается порядка времени между столкновениями.

Время между столкновениями частиц в плазме уменьшается с ростом плотности и растет с увеличением температуры:

$$\tau = 3 \cdot 10^4 T^{3/2} / n.$$

Поэтому произведение $n\tau$ для ловушки с магнитными пробками от плотности не зависит: $n\tau = \text{const} \cdot T^{3/2}$. Так что для увеличения $n\tau$ плазма в такой ловушке должна иметь как можно более высокую температуру.

Так как электроны гораздо легче ионов, при одинаковой температуре их скорость и частота столкновений значительно выше, чем у ионов. Поэтому электроны попадают в конус потерь и уходят из ловушки быстрее ионов. Излишек ионов, задержавшихся в ловушке, создает положительный электрический заряд. Электрическое поле этого заряда тормозит уходящие электроны и, наоборот, увеличивает скорость ухода ионов. В конце концов устанавливается такое значение избыточного заряда, при котором скорости потерь электронов и ионов уравниваются. Благодаря этому избыточному заряду плазма в пробочной ловушке приобретает положительный потенциал. Его значение пропорционально электронной температуре T_e и логарифмически зависит от плотности, температуры и массы ионов и электронов:

$$\Phi = 3,76 \cdot 10^{-5} T_e \lg \left(\frac{n_e}{n_i} \sqrt{\frac{T_e M_i}{T_i m_e}} \right).$$

С учетом этого эффекта расчеты произведения $n\tau$ в ловушке с магнитными пробками дают такую формулу $n\tau = 2,3 \cdot 10^{18} E_0^{3/2} \lg \frac{B_{\max}}{B_0}$. Здесь E_0 — энергия в килоэлектронвольтах, с которой ионы поступают в ловушку от внешнего источника. Из этой формулы следует, что выполнить условие Лоусона в ловушке с магнитными пробками можно, если энергия ионов будет $E_0 \approx 400$ кэВ.

Первые опыты

Эксперименты с магнитными ловушками начались в начале 50-х годов. Первым делом надо было проверить способность ловушки с магнитными пробками удерживать отдельные заряженные частицы. Эти опыты были поставлены одновременно и независимо

С. Н. Родионовым в Москве и Гибсоном, Иорданом и Лауэром в США.

В обоих экспериментах результаты измерений показали, что ловушка с магнитными пробками удерживает отдельные заряженные частицы очень хорошо — прежде чем покинуть ловушку частица много миллионов раз пролетает между пробками и только столкновения с атомами газа, оставшимися в ловушке, приводят к тому, что время жизни частицы в ловушке не превышает нескольких секунд.

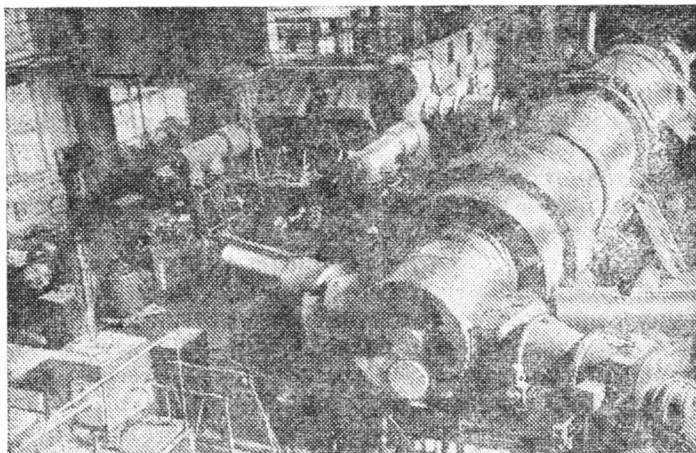


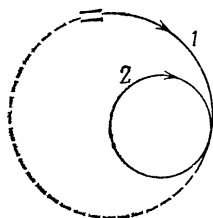
Рис. 3.3. Общий вид установки «Огра».

Окрыленные этим результатом, ученые приступили к экспериментам с плазмой. На первых порах пришлось решать проблему заполнения ловушки плазмой — в идеальную ловушку частице так же трудно попасть, как и выйти из нее. Если источник находится снаружи ловушки, траектория частицы обязательно выводит ее из ловушки снова наружу. Чтобы этого не произошло за время, пока частица входит в ловушку и выходит из нее, нужно изменить какие-то параметры, которые влияют на траекторию частицы. Например, заряд или массу частицы или же индукцию магнитного поля в ловушке.

Первый из этих способов — изменение массы частицы, предложенный советским ученым Г. И. Будкером в 1953 г., был использован в экспериментах на советской установке «Огра» и американской установке «ДСХ».

«Огра» — самая большая, построенная до сих пор, магнитная ловушка (рис. 3.3). «Огра» имела вакуумную камеру диаметром 1,4 м и длиной 12 м. Магнитное поле в средней части ловушки могло достигать 0,5 Тл, а в пробках на концах ловушки до 0,8 Тл. Размеры ловушки отражают степень уверенности в успехе. Предполагалось,

Рис. 3.4. Схема инъекции и захвата ионов в ловушку, основанная на использовании диссоциации молекулярных ионов: 1 — траектория молекулярного иона; 2 — траектория атомарного иона.



что это будет уже почти термоядерный реактор. Само название «Огра» образовано по первым буквам фразы: «один грамм нейтронов в сутки». Именно такое количество нейтронов надеялись получить в термоядерных реакциях в этой установке.

В первых экспериментах на установке «Огра» для заполнения ловушки плазмой использовался пучок молекулярных ионов водорода H_2^+ . Захват ионов по идее Будкера происходит в результате диссоциации ионов H_2^+ на атомах остаточного газа в ловушке. При этом образуется ион H^+ , масса которого в 2 раза меньше. Соответственно, вдвое уменьшается и радиус его орбиты в магнитном поле ловушки и происходит захват (рис. 3.4).

Для создания пучков ионов H_2^+ сбоку от ловушки помещался источник, в котором горел дуговой разряд. Ионы H_2^+ вытягивались из плазмы этого разряда электрическим полем и разгонялись им до энергии 160 кэВ. Ионы влетали в магнитное поле под углом 70° к направлению силовых линий и двигались внутри ловушки по спирали. После диссоциации радиус спиральной траектории резко уменьшается, и ион при своем движении в ловушке уже не мог натолкнуться на источник. Таким способом удалось заполнить ловушку горячей плазмой плотностью $10^{13} - 10^{14} \text{ м}^{-3}$.

Остроумный метод заполнения ловушки плазмой был применен на другой советской установке — ловушке «ПР-1», где работа велась под руководством М. С. Иоффе. Установка «ПР-1» имела гораздо более скромные размеры, чем «Огра», — расстояние между магнитными пробками

около 1 м, а диаметр вакуумной камеры 0,5 м. Магнитное поле в центре камеры было 0,2 Тл, а в пробках 3,4 Тл. Для заполнения этой ловушки плазмой в центре одной из пробок устанавливался источник холодной плазмы (рис. 3.5). Плазма из источника распространялась вдоль оси ловушки. Во второй пробке устанавливался

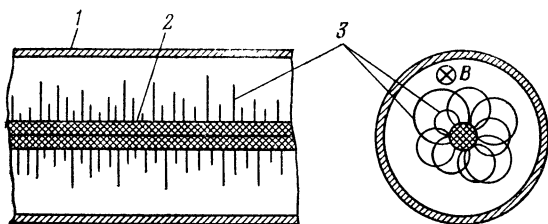


Рис. 3.5. Схема установки типа «ПР-1»: 1 — стенка камеры; 2 — столб холодной плазмы; 3 — быстрые ионы.

электрод, с помощью которого вдоль шнура холодной плазмы зажигалась электрическая дуга. Затем между обоими электродами и стенкой вакуумной камеры прикладывалось напряжение до 6000 В. В результате внутри ловушки между шнуром холодной плазмы на оси и стенкой вакуумной камеры появлялось радиальное электрическое поле. Под действием этого поля ионы вылетали из холодной плазмы и ускорялись. Магнитное поле ловушки заставляло эти ионы двигаться по спирали, а вылетать из ловушки через пробки они не могли, так как их скорость была почти перпендикулярна к магнитному полю. Таким образом происходило накопление ионов. Необходимое количество электронов появлялось в процессе ионизации остаточного газа, заполнявшего камеру. В результате в ловушке создавалась плазма.

После проверки работоспособности такого способа заполнения ловушки плазмой была построена еще одна ловушка «ПР-2» с увеличенной по сравнению с «ПР-1» индукцией поля и улучшенным вакуумом. Индукция поля в новой ловушке была 0,8 Тл в центре и 1,25 Тл в пробках. Новые улучшенные вакуумные насосы позволили довести вакуум до 10^{-5} Па. Улучшение вакуума в ловушке очень важно с точки зрения исследования времени удержания плазмы. Так как при столкновении частиц плазмы с атомами остаточного газа, с одной стороны, может происходить увеличение плотности плазмы в резуль-

тате ионизации атомов остаточного газа, а с другой стороны, дополнительные потери горячих ионов в результате перезарядки. Перезарядка — это перескок электрона при столкновении атома с ионом от одного ядра к другому. В результате вместо бывшего горячего иона образуется быстро летящий атом, который спокойно уходит сквозь магнитное поле на стенку, а вместо бывшего атома образуется холодный ион. Все эти процессы искажают истинную картину удержания плазмы в ловушке и потому улучшение вакуума в этих опытах очень существенно. С помощью той же методики, что и на установке «ПР-1», в установке «ПР-2» удалось получить плазму плотностью $10^{14} - 10^{15} \text{ м}^{-3}$. Температура ионов при этом достигала 10^7 К , а температура электронов $2 \cdot 10^5 \text{ К}$. При таких параметрах плазмы время жизни частиц в ловушке, если бы их уход был связан только с попаданием в конус потерь в результате столкновений, должно было бы достигать нескольких секунд. Даже при учете перезарядки на остаточном газе время жизни должно было быть достаточно большим.

На самом деле время жизни плазмы в ловушке оказалось значительно меньше ожидаемого. Более того, исследования показали, что большая часть плазмы уходит не через магнитные пробки, а поперек поля на боковые стенки камеры.

Такое поведение плазмы не было неожиданностью для экспериментаторов. Еще до начала опытов на установке «ПР-2» теоретики Б. Б. Кадомцев в СССР и Розенблют и Лонгмайр в США предсказали, что из ловушек с магнитными пробками плазма может уходить не только через пробки, но и поперек магнитного поля. Причина — снова неустойчивость, уже так сильно надоевшая физикам в опытах со самосжатыми разрядами.

Причина неустойчивости плазмы, удерживаемой в простейшей ловушке с магнитными пробками, кроется в том самом диамагнетизме плазмы, который и позволяет ее удерживать. Поскольку плазма диамагнитна, со стороны магнитного поля на нее действует сила, которая выталкивает плазму из области сильного магнитного поля в сторону более слабого. Если рассматривать не движение отдельных частиц, а плазму как целое, именно эта сила выталкивает плазму из пробок к центру ловушки. И это хорошо.

Но зато в направлении от оси ловушки по радиусу картина другая: индукция магнитного поля на оси

ловушки максимальна, а к боковой стенке падает. В этих условиях плазма тоже может находиться в равновесии, но равновесие это неустойчиво. Представим себе, что на боковой поверхности плазмы появился небольшой выступ, по форме похожий на «язык», высунувшийся между линиями магнитной индукции (рис. 3.6). Плазма в «языке»

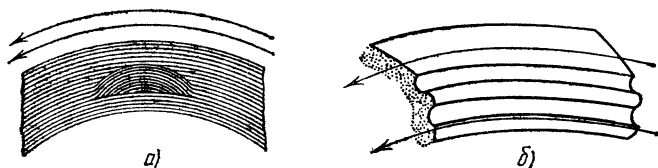


Рис. 3.6. Желобковая неустойчивость: а) «язык» на поверхности плазмы; б) образование желобков на поверхности плазмы.

попадает при этом в область более слабого магнитного поля и под действием своего давления начнет высовываться еще дальше, а там давление магнитного поля еще меньше, и так далее. Дело кончится тем, что «язык» вытянется до самой боковой стенки камеры и там плазма погибнет.

Эта неустойчивость получила название желобковой, потому что рядом с плазменным «язычком», высунувшимся между линиями магнитной индукции, образуется вытянувшаяся вдоль этих линий ямка — желобок, глубина которого тоже стремится неограниченно нарастать. Так как раздвигание линий магнитной индукции требует хоть и небольшой, но все же затраты энергии, плазма очень малой плотности еще может держаться, а с повышением плотности скорость ухода плазмы должна резко возрастать.

В ловушке с магнитными пробками есть участки, где индукция магнитного поля нарастает по радиусу и, следовательно, плазма там должна быть устойчива. Эти участки расположены вблизи пробок. А участки со спадающей индукцией по радиусу находятся вблизи центра ловушки. Отличать такие участки друг от друга очень просто. Там, где индукция магнитного поля нарастает, от оси линии магнитной индукции обращены к плазме выпуклостью, а там, где спадает, эти линии вогнутые в сторону плазмы (рис. 3.7). Поэтому можно заранее предсказать, где плазма будет вести себя устойчиво, а где нет.

Все эти довольно подробные предсказания теории были проверены в экспериментах на установке «ПР-2», а затем и на установке «Огра». Было обнаружено именно такое поведение плазмы, как предсказывала теория. Неустойчивость развивалась на тех участках, где и ожидалась. Скорость развития неустойчивости и значение критиче-

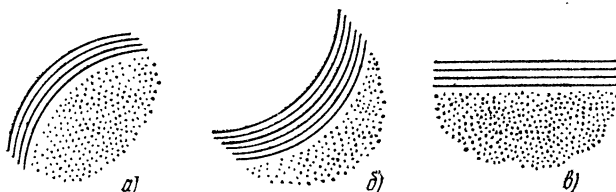


Рис. 3.7. Признак неустойчивости удержания плазмы магнитным полем: а) неустойчивая конфигурация; б) устойчивая; в) нейтральная.

ской плотности плазмы, когда неустойчивость становится особенно быстрой, оказались в хорошем согласии с теорией. Результаты этих опытов были доложены на Первой Международной конференции по физике плазмы и УТС в австрийском городе Зальцбурге в 1961 г. Обнаружение желобковой неустойчивости имело большое значение для всей термоядерной проблемы в целом. Ведь это был первый случай, когда довольно сложное поведение плазмы было полностью понято теоретически и имелось полное и качественное и количественное согласие между теорией и экспериментом.

«Палки Иоффе», принцип «минимума B »

После того как желобковая неустойчивость была обнаружена и понят ее механизм, нужно было придумать и способы борьбы с ней. Поскольку причина развития желобковой неустойчивости связана с уменьшением индукции магнитного поля в средней части ловушки, самый кардинальный способ борьбы с этой неустойчивостью — это такое изменение конфигурации магнитного поля, при котором магнитная индукция возрастала бы по мере удаления от оси. Одна из первых идей состояла просто в том, чтобы переключить ток в одной из катушек обычной ловушки с магнитными пробками в обратную сторону. Такую ловушку поэтому называют антипробкотроном. В этом случае магнитные поля, созда-

ваемые катушками, направлены в противоположные стороны. В середине ловушки между катушками магнитные поля полностью компенсируются и индукция поля получается равной нулю. Образуется конфигурация, показанная на рис. 3.8. В этой конфигурации линии индукции

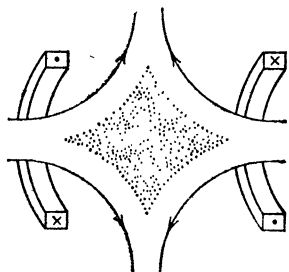


Рис. 3.8. Магнитная ловушка типа «антипротонотрон».

магнитного поля всюду выпуклы в сторону плазмы. Так что в соответствии с предсказаниями теории желобковая неустойчивость плазмы в такой ловушке не должна развиваться.

Опыты показали, что это действительно так, но время удержания плазмы в антипротонотроне все равно получилось небольшим. Дело оказалось в том, что в центре ловушки, где индукция поля обращается в ноль, значение адиабатического инварианта W_{\perp}/B не сохраняется.

В результате нарушается условие отражения частиц от магнитных пробок.

В группе М. С. Иоффе нашли другой способ изменения конфигурации магнитного поля. С этой целью были применены дополнительные проводники с током — «палки Иоффе». Шесть таких проводников были расположены по периферии ловушки параллельно ее продольной оси (рис. 3.9). Направление токов в соседних проводниках чередовалось. Магнитное поле этих проводников складывалось с полем ловушки. В результате индукцию на периферии ловушки можно было увеличивать, увеличивая силу тока в проводниках, в то же время суммарная индукция всех шести проводников на оси ловушки все время остается равной нулю, так что B_0 на оси не изменяется.

Опыты по удержанию плазмы на новой установке — ее называли «ПР-5» — показали, что «палки Иоффе» работают великолепно. В полном соответствии с теорией, как только отношение величины B на периферии к B_0 на оси ловушки становилось больше 1, скорость потерь резко падала и время удержания плазмы в ловушке значительно увеличивалось (рис. 3.10).

Эти эксперименты оказали очень сильное воздействие на развитие исследований по проблеме УТС. Впервые было достигнуто не только детальное понимание поведе-

ния плазмы, но и доказана возможность сознательного управления им. Принцип подавления неустойчивости плазмы с помощью такого изменения конфигурации магнитного поля, чтобы его индукция нарастала от плазмы наружу, стал основным оружием в борьбе с неустойчивостями плазмы и на других установках. При конструировании новых магнитных ловушек теперь уже всегда проверяется, а соблюден ли принцип «минимума B », т. е. ловушку стараются сконструировать так, чтобы величина B

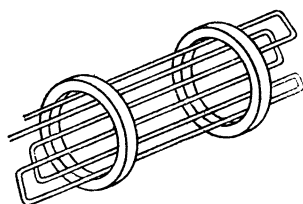


Рис. 3.9. Схема ловушки с «палками Иоффе».

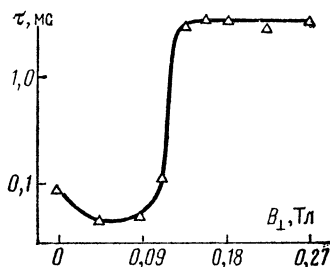


Рис. 3.10. Зависимость времени удержания плазмы в установке «ПР-5» от поперечного магнитного поля.

в области занятой плазмой имела бы минимальное значение и по возможности возрастала бы от границ плазмы наружу во всех направлениях. Правда, это не всегда удается.

Тогда стараются добиться, чтобы принцип «минимума B » выполнялся хотя бы в среднем при движении вдоль линий индукции на участках, доступных для частиц плазмы.

В конструкцию пробочной ловушки с «палками Иоффе» в дальнейшем был внесен ряд чисто инженерных усовершенствований. Сначала обнаружили, что если сократить число «палок Иоффе» до четырех, то все их вместе с катушками, создающими основное поле, можно заменить одной катушкой сложной формы, ток в которой течет по тому же пути, что и в первоначальной ловушке. Форма этой катушки напоминает форму шва на теннисном мяче, или на таком же мяче, используемом в американской игре бейсбол, аналогичной русской лапте. По имени этой игры такая катушка называется бейсбольной (рис. 3.11, г).

Затем было обнаружено, что объем плазмы в бейсбольной ловушке можно заметно увеличить, если разрезать бейсбольную катушку вдоль на две половинки и слегка раздвинуть их (рис. 3.11, *д*). Получилась конфигурация, похожая на китайский иероглиф «инь-янь», поэтому такие обмотки стали называть Инь-Янь. Структура

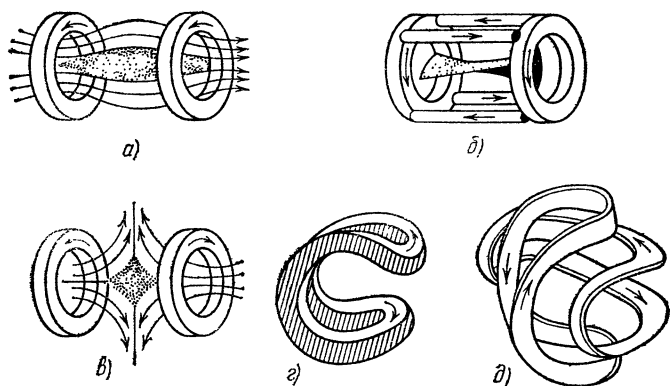


Рис. 3.11. Развитие конструкции ловушек с магнитными пробками: а) простое пробочное поле; б) ловушка Иoffe; в) система с встречными полями; г) бейсбол; д) Инь-Янь.

магнитного поля в ловушках с бейсбольной обмоткой или с обмотками Инь-Янь по сути не отличается от структуры поля в ловушке с «палками Иoffe». Здесь тоже выполняется принцип «минимума B ». Поэтому именно такие обмотки обычно предполагают использовать в проектах термоядерных реакторов.

Кроме изменения конфигурации магнитного поля, для борьбы с желобковой неустойчивостью успешно использовался также метод активного управления поведением плазмы с помощью электрических полей. Этот метод получил название «метод обратных связей». Термин взят из кибернетики — науки об управлении. При управлении любым объектом, живым или неживым, важную роль играет обратная связь с управляемым объектом. С помощью этой связи управляющая система узнает, что же получилось в результате управляющего воздействия — стало лучше или хуже, и соответственно корректирует эти воздействия. Например, когда человек хочет взять со стола карандаш, обратная связь осуществляется с помощью зрения. Пользуясь этой обратной связью мозг

контролирует положение руки относительно цели и корректирует движение мышц таким образом, чтобы расстояние до цели сокращалось.

Аналогичная система была применена и для подавления неустойчивости плазмы в ловушке. Воздействие на движение плазмы осуществлялось с помощью электрического поля, которое возбуждалось при подаче напряжения на электроды, окружающие плазму в ловушке. В качестве обратной связи использовались сигналы датчиков, измеряющих колебания электрического поля в плазме. Эти сигналы усиливались и подавались на электроды, управляющие электрическими полями в плазме. Меняя задержку сигнала, подаваемого на электроды, по отношению к сигналу из плазмы, можно было сделать так, что колебания плазмы усиливались, или же наоборот, колебания в плазме гасились.

Метод обратных связей был впервые применен для борьбы с желобковой неустойчивостью на советских установках «Огра-II» и «Огра-III», а также в совместной советско-английской работе на английской установке «Феникс-II». На установке «Огра-III» в результате подавления желобковой неустойчивости этим методом плотность плазмы удалось увеличить в 50 раз. В дальнейшем метод обратных связей стал применяться и на других установках.

Другие неустойчивости

Победа над желобковой неустойчивостью позволила увеличить время жизни плазмы в ловушках с магнитными пробками в 40–50 раз. При этом во столько же раз уменьшились потери плазмы и тогда стали заметны другие, более тонкие неустойчивости. В отличие от желобковой неустойчивости, которая была связана с движением плазмы как целого, эти неустойчивости касаются движения отдельных групп частиц. Движения отдельных групп частиц изучает раздел механики, называемый кинетикой. Поэтому такие неустойчивости называют кинетическими.

Из-за ухода частиц в конус потерь распределение частиц по скоростям становится неравновесным — частиц с малой скоростью v_{\perp} , перпендикулярной к магнитному полю, оказывается значительно меньше, чем с большой, в то время как обычно, в газе или плазме, находящимся в тепловом равновесии, бывает как раз наоборот.

Подобное неравновесное состояние используется в лазерах. За счет избытка высокоэнергичных частиц как раз и происходит генерация лазерного излучения. Но там, чтобы получить неравновесное распределение частиц, приходится здорово повозиться. А в пробкотроне такое неравновесное состояние получается само собой.

Естественно, избыток энергичных частиц приводит, как и в лазерах, к генерации волн. Только в лазере — это электромагнитные волны радио- или светового диапазона, а в пробкотроне — это плазменные волны.

Кинетические неустойчивости наблюдали на многих установках, где плазма создавалась путем инжекции частиц большой энергии. Энергия инжектируемых частиц в этих экспериментах составляла несколько десятков тысяч электронвольт.

При такой энергии частиц реакция $D+T$ уже может идти с достаточно большой скоростью. После подавления желобковой неустойчивости возникла надежда, что путем накопления энергичных частиц в ловушке удастся получить плазму с реакторными параметрами.

Оказалось, однако, что накопление частиц в таких установках идет только до определенной плотности $\sim 10^{15} \text{ м}^{-3}$, а затем в плазме возникают колебания и плотность перестает возрастать, несмотря на продолжающееся поступление частиц из инжектора. Такое поведение плазмы наблюдалось на советской ловушке «Огра-II», английской «Феникс-II», американской «Алиса-Бейсбол».

Метод грубой силы

К этому времени для накопления плазмы начали использоваться пучки быстрых атомов. Внутри ловушки происходит ионизация этих атомов, а образующиеся ионы и электроны захватываются магнитным полем. Вначале поток частиц в пучке был невелик — около 10^{18} частиц/с. Если бы эти частицы были заряжены, то такой пучок переносил бы электрический ток силой 0,15 А. Интенсивность пучков нейтральных атомов так и принято характеризовать — величиной эквивалентного тока в амперах. В начале 70-х годов в технике получения пучков быстрых нейтральных атомов произошел резкий скачок. Были разработаны источники, дающие пучки с эквивалентным током в десятки ампер.

Новые источники позволили расправиться с кинетическими неустойчивостями методом грубой силы. При ин-

тепсивности пучка в десятки эквивалентных ампер плотность плазмы в ловушке, несмотря на неустойчивости, быстро возрастала. Уже через тысячные доли секунды плотность плазмы в ловушке достигает 10^{20} м^{-3} . Такие результаты были получены на американской установке «2 X IIВ», где метод грубой силы был применен впервые, получена плазма с такими же плотностью и температурой ионов, которые нужны для термоядерного реактора. При этом давление плазмы уже почти сравнивается с давлением магнитного поля. Индукция магнитного поля в центре ловушки из-за диамагнетизма плазмы ослабляется почти до нуля. В результате пробочное отношение B_{max}/B возрастает, так что удержание частиц даже улучшается.

Однако с удержанием энергии получилось не столь прекрасно. Время удержания энергии измерялось всего лишь тысячными долями секунды, так что произведение $n\tau$ было значительно ниже, чем нужно по критерию Лоусона. Причина быстрого охлаждения ионов плазмы в этих экспериментах была связана с очень низкой температурой электронов.

Низкая температура электронов в установке «2 X IIВ» получалась из-за инъекции большого количества холодной плазмы, или холодного газа, который уже в ловушке превращался в холодную плазму. Холодная плазма пужна была для стабилизации кинетических неустойчивостей, которые в противном случае приводили к быстрому уходу горячих частиц из ловушки. Для дальнейшего продвижения к цели нужно было искать пути улучшения удержания горячей плазмы в ловушках с магнитными пробками.

Тандемные ловушки

Трудную работу по уменьшению потерь частиц через пробки лучше всего поручить самой плазме. К этой идее пришли независимо в 1976 г. советский ученый Г. И. Димов и несколько позже американские ученые Фаулер и Логан.

Как мы уже рассматривали в начале этой главы, из-за того, что скорость электронов при одинаковой температуре значительно больше скорости ионов, электроны уходят из ловушки быстрее. В результате в ловушке возникает избыточный положительный заряд, и плазма приобретает потенциал
$$\Phi = 3,76 \cdot 10^{-5} T_e \lg \left(\frac{r_e}{n_i} \sqrt{\frac{T_e M_i}{T_i m_e}} \right).$$

Возникшее электрическое поле тормозит уход электронов и ускоряет уход ионов. В простой пробочной ловушке последствия возникновения этого заряда весьма неприятны — скорость потерь ионов увеличивается, а удержание электронов приводит к их дополнительному охлаждению, так как их уход становится неравномерным — самые энергичные электроны преодолевают притяжение ионов и уходят, а остаются самые холодные.

Чтобы избавиться от этих недостатков, Димов в 1976 г. предложил сделать не одну, а три пробочных ловушки, расположенные подряд с общим магнитным полем. Плотность плазмы в крайних ловушках с помощью очень мощной инжекции делается значительно больше, чем в центральной ловушке. Тогда уход частиц через пробки крайних ловушек вызовет появление избыточного положительного потенциала у всей системы в целом. Что здесь будет новым, это появление избыточного отрицательного заряда в средней ловушке. Он возникает из-за более мощного потока электронов из крайних ловушек в среднюю, чем в обратном направлении. Этот избыточный отрицательный заряд создает электрическое поле, улучшающее удержание ионов в средней ловушке.

Ловушка такого типа получила название тандемной ловушки, потому что крайние и центральная ловушки очень удачно дополняют и помогают друг другу, как велосипедисты на двухместном велосипеде — тандеме.

Крайние ловушки небольшого объема служат для создания объемного заряда, улучшающего удержание ионов в центральной ловушке. В свою очередь поток холодной (относительно, конечно) плазмы из центральной ловушки заполняет конус потерь и стабилизирует неустойчивость в боковых ловушках.

Температуру плазмы в средней ловушке можно сделать оптимальной, с точки зрения скорости термоядерных реакций, — $3 \cdot 10^8$ К. Тогда для удержания ионов в ней необходимо, чтобы отрицательный заряд создавал между средней и крайними ловушками разность потенциалов примерно в 100 кВ. Чтобы создать такой потенциал, плотность плазмы в крайних ловушках должна быть примерно в 3 раза больше, чем в центре, а энергия ионов, инжектируемых в крайние ловушки должна быть 1 или 2 МэВ.

Затраты энергии на поддержание температуры ионов в тандемной ловушке в основном связаны с инжекцией пучков в крайние ловушки. Чтобы покрыть эти затраты,

объем средней ловушки, где будут идти термоядерные реакции, должен быть довольно большим. По-видимому, длина центральной ловушки должна быть не менее 100 м. Однако конструктивно это может быть очень простая система — магнитное поле в центральной ловушке может

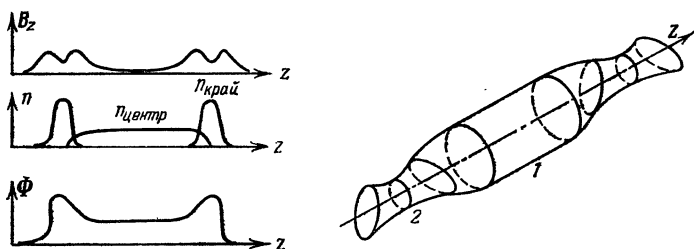


Рис. 3.12. Тандемная ловушка. Распределение индукции магнитного поля, плотности плазмы, электрического потенциала и конфигурация магнитного поля: 1 — центральный соленоид со слабым полем; 2 — ловушка с полем типа «минимум B » на концах.

быть однородным и не очень сильным, ведь плотность плазмы в центральной ловушке невелика. Поле сложной конфигурации, обеспечивающее выполнение принципа «минимума B » для всей системы, нужно только в небольших по объему крайних ловушках (рис. 3.12).

Таким образом, термоядерный реактор на основе тандемной ловушки обещает быть несложным по конструкции и недорогим.

Эти замечательные перспективы вдохновили ученых на энергичное исследование физических процессов в тандемных ловушках в целях проверки основных идей. Уже через 2—3 года после того как идея тандемной ловушки была высказана в СССР, США и Японии приступили к сооружению первых тандемных ловушек. В начале 80-х годов первые небольшие по размерам ловушки были готовы и на них начались исследования.

В этих экспериментах подтвердилась основная идея тандемной ловушки: за счет разной плотности плазмы в крайних и средней ловушках удалось создать электрическое поле, существенно улучшающее удержание плазмы в центральной ловушке.

Время удержания частиц и энергии вблизи оси ловушки оказалось в хорошем соответствии с предсказаниями теоретических расчетов, выполненных советским

ученым В. П. Пастуховым. Однако на периферии плазмы наблюдается повышенная скорость потерь, свидетельствующая о развитии какой-то неустойчивости в этой области. Исследование механизма этих повышенных потерь и борьба с ними — предмет дальнейшей работы в ближайшие годы. Параметры плазмы, достигнутые в этих первых экспериментах ($n \approx 3 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$, $T \approx 1,5 \cdot 10^6 \text{ К}$), и время удержания энергии ($\tau_E \approx 5 \cdot 10^{-4} \text{ с}$) выглядят пока довольно скромно.

По-видимому, гораздо более впечатляющие результаты будут получены на установках следующего поколения, сооружаемых в настоящее время. Одна из них строится в Сибирском отделении АН СССР в Новосибирске. Эта установка называется «Амбал». Температура плазмы в ловушках «Амбал» ожидается порядка 10^7 К .

В СССР исследования по ловушкам с магнитными пробками ведутся широким фронтом. В настоящее время эксперименты по удержанию плазмы в «классической ловушке» ведутся на установке «Огра-IV».

«Огра-IV» имеет сверхпроводящую магнитную систему бейсбольной конфигурации. Плазма создается с помощью четырех инжекторов нейтральных атомов с энергией 15–30 кэВ и эквивалентным током до 20 А. Изучаются колебания плазмы, механизм потерь через пробки при наличии «минимума В» и разрабатываются способы борьбы с ними.

На установке «ПСП-2» в Новосибирске исследуется идея борьбы с конусными неустойчивостями путем вращения плазмы. Для этого в ловушке «ПСП-2» создается сильное радиальное электрическое поле. В этом поле плазма приходит в быстрое вращение вокруг продольной оси ловушки. При этом увеличивается отношение поперечной скорости частиц к продольной, и потери через конус потерь уменьшаются.

Еще одна установка, построенная в Новосибирске, — «ГОЛ-3» предназначена для проверки идеи «стеночного удержания». Она представляет собой очень длинную цепочку из простых пробочных ловушек. Длина цепочки должна превышать длину свободного пробега ионов и электронов в плазме. Тогда частица, попавшая в конус потерь, не успев вылететь из ловушки, испытает соударение, в результате которого направление скорости изменится и частица останется в ловушке. По расчетам при термоядерных параметрах плазмы длина ловушки должна быть 100–200 м. Еще более интересная идея заложена

в эту установку касательно поперечного удержания плазмы. Плотность плазмы делается настолько большой, что ее давление превышает давление магнитного поля: $\beta > 1$. Как мы знаем, при этих условиях магнитное поле не сможет удерживать плазму. «Ну и пусть — говорят новосибирские физики, — плазму удержит стальная стенка установки. Роль магнитного поля в этой установке сводится только к снижению потерь тепла за счет теплопроводности».

Если эта идея окажется удачной, термоядерный реактор на основе многопробочной ловушки со стеночным удержанием не будет иметь конкурентов по простоте и экономичности.

Посмотрим на карту поля боя

Исследования ловушек с магнитными пробками ведутся уже свыше 25 лет. За это время пройден огромный путь. По сравнению с первыми ловушками плотность плазмы удалось увеличить в 10^6 раз, температуру плазмы уже удается довести до нужного для термоядерного реактора уровня. Единственный параметр,

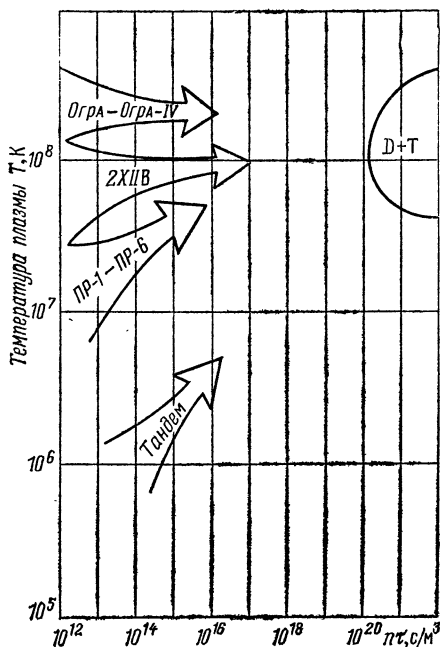


Рис. 3.13. На карте поля боя видно, что до цели еще очень далеко.

по которому еще остается значительная дистанция до заветной цели,— это величина $n\tau$ (рис. 3.13). Но и в этом направлении наметился значительный прогресс. Благодаря детальному изучению физики удержания плазмы в ловушках удалось разобраться в механизмах потерь и изобрести меры для борьбы с ними. Тем самым исследования на пробочных ловушках внесли большой вклад в понимание физики плазмы и способствовали прогрессу других направлений.

Успехи в улучшении удержания плазмы в пробочных ловушках за последние годы выдвинули их в число вероятных кандидатов на роль основы термоядерного реактора. Их основные достоинства — простота конструкции и экономичность, связанная с возможностью удержания плазмы при $\beta \approx 1$.

Правда, для реализации этих преимуществ нужно пройти еще не малый путь — за счет улучшения времени удержания предстоит увеличить $n\tau$ примерно в 1000 раз. Но обилие прогрессивных идей и широкий фронт работ в этом направлении во многих лабораториях мира не оставляют сомнений, что этот путь будет пройден и принципиальная возможность осуществления термоядерного реактора на основе пробочного удержания будет доказана еще до конца этого века.

ГЛАВА IV

СТЕЛЛАРАТОР

Сделаем ловушку замкнутой!

Самый радикальный способ избавиться от потерь плазмы через торцы магнитной ловушки — вообще избавиться от торцов. Это можно сделать, согнув ловушку в кольцо и соединив концы друг с другом. Ловушка принимает форму бублика или, как его называют математики, — тора (рис. 4.1).

Однако простой тор с магнитным полем работать в качестве магнитной ловушки не будет. Дело в том, что индукция магнитного поля при сгибании прямой трубы в тор становится неоднородной. На внутренней стороне тора она возрастает, а на внешней — уменьшается. Как мы подробно рассматривали в гл. I, при движении заряженных частиц в неоднородном магнитном поле возникает дрейф — частицы постепенно смещаются в направлении,

перпендикулярном направлению неоднородности поля. Положительно заряженные ионы собираются в нижней части трубы, а отрицательно заряженные электроны уходят вверх. В результате возникает электрическое поле, направленное вверх по вертикали. Теперь заряженные частицы должны двигаться в двух полях — в магнитном поле,

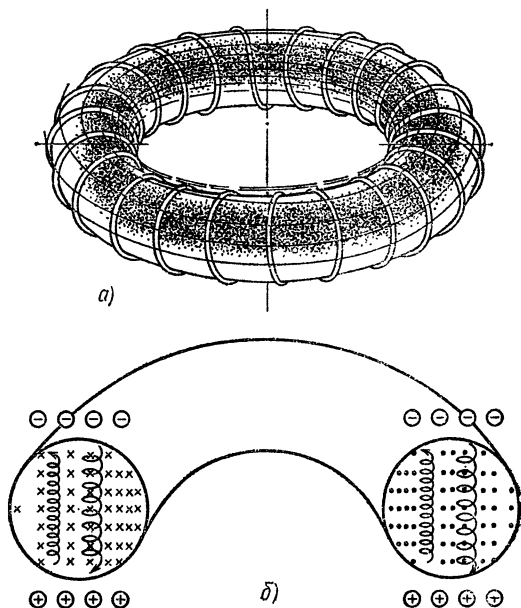


Рис. 4.1. а) Магнитная ловушка — тор; б) разрез тора. Разделение зарядов в тороидальной ловушке из-за неоднородности магнитного поля.

направленном вдоль трубы, и вертикальном электрическом поле. Траектория движения частиц в таком случае принимает вид спирали, с каждым витком смещающейся по горизонтали по направлению к внешней стенке тора. В результате плазма быстро вылетит на стенку.

Этот сложный анализ движения заряженных частиц в тороидальном магнитном поле в 1950 г. провели советские и американские ученые. Для борьбы с тороидальным дрейфом советские ученые предложили пропускать по плазме электрический ток.

Сконструированная на основе этого предложения магнитная ловушка получила впоследствии название «тока-

мак». Токамаки сейчас — самое перспективное направление в магнитном удержании плазмы. Но о них мы подробнее расскажем в следующей главе.

В США развитие магнитного удержания началось по инициативе Л. Спитцера. (Л. Спитцер — известный астрофизик, много занимавшийся движением плазмы в межзвездных магнитных полях.) Разобравшись в пороках тороидального магнитного поля, Спитцер нашел свой способ как с ними бороться. Он предложил свернуть тор

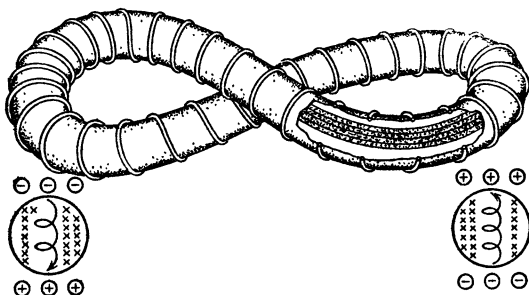


Рис. 4.2. Сгибание тора в виде цифры «8» приводит к взаимной компенсации избыточных зарядов, возникающих из-за дрейфа частиц.

в виде цифры «8». В этом случае ловушка представляет собой как бы два тора, соединенных между собой таким образом, что заряженная частица обходит один тор, двигаясь по часовой стрелке, а другой — в противоположном направлении. В результате дрейф частиц компенсируется.

В такой ловушке силовые линии магнитного поля перестают замыкаться сами на себя после обхода вокруг ловушки. Заряженные частицы плазмы теперь получают возможность, двигаясь вдоль силовых линий магнитного поля, переходить из верхней части трубы в нижнюю и наоборот. Поэтому разделения зарядов не происходит и не возникает вертикальное электрическое поле, которое приводило к столь печальным последствиям в простой тороидальной ловушке (рис. 4.2). Такая ловушка должна удерживать заряженные частицы очень хорошо.

Для своей ловушки Спитцер придумал красивое и звучное название — стелларатор — звездный тор, имея в виду, что в этой ловушке должны происходить те же термоядерные реакции, которые идут в недрах звезд. Летом 1951 г. Спитцер предложил целую программу решения тер-

моядерной проблемы с помощью стеллараторов. Программа была принята и работа началась.

Программа состояла из четырех стадий и предполагала последовательное сооружение стеллараторов все большего размера. Каждая стадия была нацелена на выяснение определенного круга вопросов.

Стелларатор «А» — установка настольного размера с слабым магнитным полем имела целью проверить принципиальную возможность удержания в ловушке такого типа заряженных частиц, как, например, электронов.

Следующая модель — стелларатор «В» — установка с вакуумной камерой диаметром 5 см имела магнитное поле до 3 Тл и могла уже работать с плазмой.

Следующий этап — стелларатор «С» — с вакуумной камерой диаметром 20 см и магнитным полем до 5 Тл был задуман как модель в $1/4$ натуральной величины термоядерного реактора.

Наконец, стелларатор «D» представлял собой уже прототип реактора, в котором должна была производиться в заметных количествах термоядерная энергия.

Работа по стеллараторной программе проводилась достаточно энергично. Уже в 1952 г. стелларатор «А» был построен. Эксперименты на этой установке подтвердили правильность основной идеи — способность стелларатора удерживать заряженные частицы. Более того, уже в этой установке начались опыты с плазмой. Плазма создавалась путем электрического пробоя газа. Оказалось, в соответствии с теоретическими ожиданиями, что пробой газа в ловушке, свернутой в виде цифры «8», происходит легче, чем в простом торе.

В 1954 г. был построен стелларатор «В-1». Сильное магнитное поле сразу же породило множество специфических проблем. Могучие силы магнитного давления деформировали катушки магнитного поля и вакуумную камеру. Пришлось здорово повозиться с изобретением достаточно жестких креплений, которые могли бы выдерживать эти силы. Затем начались опыты с плазмой. И сразу же возникла проблема примесей. По непонятным в то время причинам плазма очень мощно взаимодействовала со стенкой вакуумной камеры. И хотя в начале опыта камера наполнялась чистым водородом, после включения разряда в плазме оказывалось много кремния, кислорода и углерода. Ионы этих примесей ярко светились. Вся энергия, которая выделялась при пропускании через плазму электрического тока и должна была по замыслу нагре-

вать плазму до высокой температуры, уносилась с излучением примесей на стенку вакуумной камеры.

Пришлось срочно переделывать установку. Керамическую вакуумную камеру заменили на трубу из нержавеющей стали. Установили самые мощные высоковакуумные насосы для откачки камеры. После этого потери энергии из-за излучения примесей несколько уменьшились и стало возможным хотя бы получить разряд.

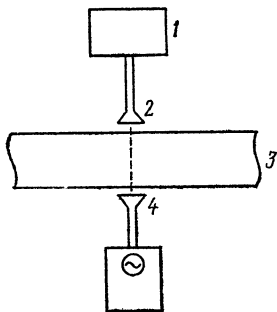


Рис. 4.3. Измерения плотности плазмы по прохождению через нее радиоволн: 1 — генератор; 2 — излучатель, 3 — плазма; 4 — приемник.

На этой установке начали отрабатывать бесконтактные методы диагностики плазмы. До этого для измерения плотности и температуры плазмы в нее вводили небольшую проволочку — зонд. Зондовый метод изобрел американский ученый Ленгмюр еще в 20-х годах при изучении разряда в газах. В таких разрядах температура плазмы не превышает нескольких тысяч градусов, и зонды Ленгмюра, сделанные из тугоплавких металлов — вольфрама или молибдена, служили

физикам верой и правдой в течение нескольких десятков лет. Но в термоядерной плазме речь пошла о миллионах градусов и, естественно, в такой плазме уже никакие, даже самые тугоплавкие зонды работать не могут.

Воспользовавшись тем, что плазма подобно металлам может отражать радиоволны, для измерения плотности плазмы использовали просвечивание плазмы пучком радиоволн. При малой плотности плазма прозрачна для радиоволн, но для каждой длины волны существует критическая плотность плазмы. При плотности, большей чем критическая, плазма отражает радиоволны с этой длиной волны подобно зеркалу и пучок радиоволн через плазму перестает проходить. Для радиоволн с длиной волны 1 см критическая плотность плазмы около 10^{19} м^{-3} . А плотности 10^{20} м^{-3} , которую желательно иметь в термоядерном реакторе, соответствует длина волны 3 мм. Если использовать набор генераторов с разными длинами волн, то можно проследить по моментам отсечки сигнала от каждого генератора моменты прохождения плотности плазмы через соответствующее критическое значение (рис. 4.3).

При таком способе измерения плотности плазмы и генератор и приемник находятся довольно далеко от границы плазмы и никакие материальные тела непосредственно с плазмой не контактируют. Поэтому этот способ измерения плотности плазмы годится при любой температуре.

Другой бесконтактный метод, впрочем, известный задолго до начала работ с плазмой,— это спектроскопия. Изучая спектр свечения плазмы, можно установить из чего она состоит. Правда, основной компонент — ядра водорода — не светится, но зато все примеси видны хорошо. По интенсивности линий ионов примесей можно измерить их количество и проследить, в какой момент времени они появляются в плазме.

Оказалось, что вспышки линий примесей соответствуют вполне определенным моментам разряда. А именно тем, когда ток разряда превышает критическое значение, установленное ранее английским физиком М. Д. Крускалом и советским физиком В. Д. Шафрановым для 'самосжимающихся разрядов. Каждый раз, когда ток разряда превышает предел Шафранова — Крускала, в плазме развивается бурная неустойчивость. Плазма прорывается сквозь магнитное поле, касается стенки и испарившиеся со стенки атомы примесей, попадая в плазму, ярко вспыхивают.

На последующих за «В-1» стеллараторах серии «В» («В-2», «В-64», «В-65», «В-3») основные усилия ученых были направлены на борьбу с неустойчивостями и примесями, поступающими в плазму со стенок. В эти годы были поняты многие важные принципы работы замкнутых систем, изобретены специальные устройства и приемы работы для борьбы с примесями. Многие из них и по сей день используются не только в стеллараторах, но и в токамаках и, по-видимому, будут неотъемлемой частью термоядерного реактора на основе замкнутых магнитных ловушек. На некоторых из них стоит остановиться подробнее.

Дивертор

Для борьбы с примесями, поступающими в плазму со стенки вакуумной камеры, в стеллараторах серии «В» было впервые применено специальное устройство — дивертор.

Принципиальная схема дивертора показана на рис. 4.4. С помощью дополнительной обмотки часть силовых линий

магнитного поля выводится из вакуумной камеры стелларатора в специальную диверторную камеру. Здесь поперек силовых линий расположена толстая приемная пластина, охлаждаемая водой.

Частицы плазмы, попавшие на эти силовые линии, — так называемый диверторный слой, свободно двигаются

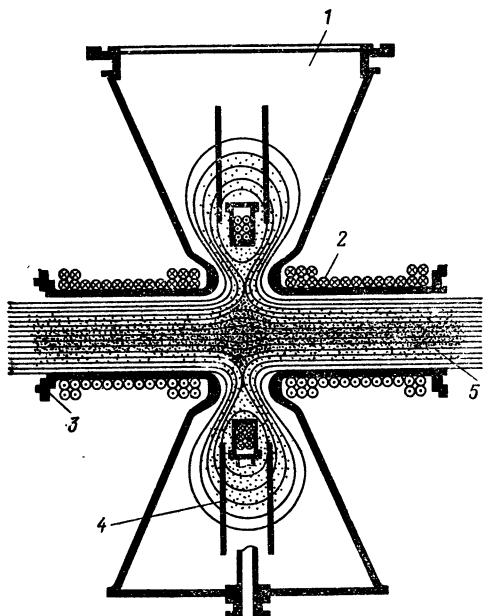


Рис. 4.4. Дивертор. С помощью дополнительной обмотки часть линий индукции магнитного поля вблизи поверхности плазмы отклоняется в отдельную камеру. Там на пути плазмы ставятся хорошо охлаждаемые пластины. При соприкосновении с этими пластинами плазма остывает и превращается в нейтральный газ, который откачивается вакуумными насосами. 1 — отверстие к диффузионному насосу; 2 — катушка магнитного поля; 3 — стенки трубки стелларатора; 4 — собирающие пластины; 5 — разрядная камера.

вдоль силовых линий и попадают в диверторную камеру. При столкновении с приемной пластиной плазма гибнет. Большая часть примесей, выбиваемых плазмой из приемной пластины, остается в диверторной камере, которая откачивается мощными вакуумными насосами. Лишь небольшая часть примесей, случайно вылетевшая в удачном направлении, может попасть через входное окно обратно в основной объем стелларатора, где находится плазма.

Испытания этого устройства показали, что идея в основном правильная — поток примесей, поступающих в плазму, при включении дивертора действительно уменьшается в несколько раз.

Винтовая обмотка. Шир

В 1954 г. американский теоретик Теллер обнаружил, что конфигурация магнитного поля в стеллараторе в виде цифры «8» неустойчива против возмущения плазмы по винтовой линии. Оказалось, что плазма ухитряется сформировать «язык», который вьется вокруг установки по спирали в точности с тем же шагом, что и силовые линии магнитного поля.

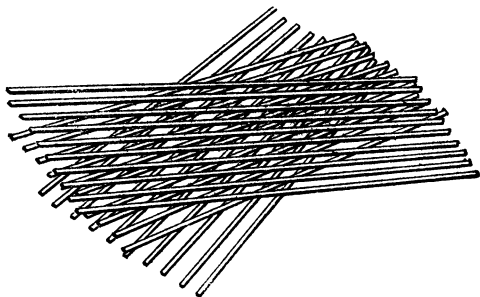


Рис. 4.5. Изменение угла поворота линий индукции магнитного поля с радиусом «шир».

Такой «язык» легко раздвигает силовые линии и пролезает между ними, не пересекая ни одну из них. Так плазма добирается до стенки. Ну, а дальше все понятно — стенка немного испаряется, в плазму поступают примеси и за счет излучения происходит резкое охлаждение плазмы.

Теория Теллера произвела большое впечатление на руководителей этих работ. В результате работы по проектированию стелларатора «С» были прекращены, а исследовательской группе в Принстоне было дано задание найти «противоядие» против теллеровской неустойчивости.

Противоядие удалось найти все тому же Л. Спитцеру. Он сообразил, что силовые линии магнитного поля в стеллараторе нужно наклонить в каждом слое под другим углом. Тогда плазменный «язык», подстроившийся под ход силовой линии в каком-то слое, наткнется в следующем

слое на силовые линии магнитного поля, идущие под другим углом и не сможет добраться до стенки не пересекая их (рис. 4.5). Чтобы этого добиться, Спитцер предложил полностью изменить конструкцию стелларатора.

Теперь вакуумная камера представляет собой плоскую фигуру, похожую по форме на беговую дорожку на стадионе — два полукруга, соединенные прямыми участками (рейстрек).

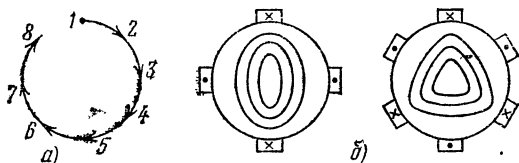


Рис. 4.6. а) Прокручивание силовых линий магнитного поля в стеллараторе; б) магнитные поверхности двухзаходного и трехзаходного стеллараторов.

На полукруглых участках на трубу намотана винтовая обмотка из нескольких пар проводников. По половине из них ток течет в одну сторону, а по другим — в обратную.

Винтовая обмотка заставляет силовые линии магнитного поля вращаться вокруг оси камеры, причем внутренние слои силовых линий прокручиваются довольно медленно, а внешние — быстро. В результате и образуется перекрещенность силовых линий. В английском языке для обозначения перекрещенности силовых линий нашли короткое слово «шир». Давайте проследим за движением заряженной частицы, находящейся внутри стелларатора, скажем, в точке 1 (рис. 4.6, а). Двигаясь вдоль силовой линии, частица обойдет вокруг стелларатора и снова вернется в то сечение, откуда мы начали за ней следить.

Прокручивание силовых линий, вызванное токами в винтовой обмотке, приведет к тому, что выбранная нами силовая линия вернется не в точку 1, а, скажем, в точку 2, повернувшись на некоторый угол i . После следующего обхода установки силовая линия попадет в точку 3 и т. д. После многих, многих обходов установки, отмечая каждый раз точки пересечения силовой линии с выбранным нами сечением, мы увидим, что эти точки ложатся на замкнутую линию. Все точки этой линии получаются при продолжении одной-единственной силовой линии, обходящей много раз вокруг стелларатора. Силовая линия образует

замкнутую поверхность, поперечное сечение которой и представляет эта линия.

Форма магнитных поверхностей зависит от числа пар проводников в винтовой обмотке. Если в ней две пары проводников, магнитная поверхность будет иметь форму эллипса, если три — форму треугольника со скругленными краями и т. д. (рис. 4.6, б). Вершины треугольника

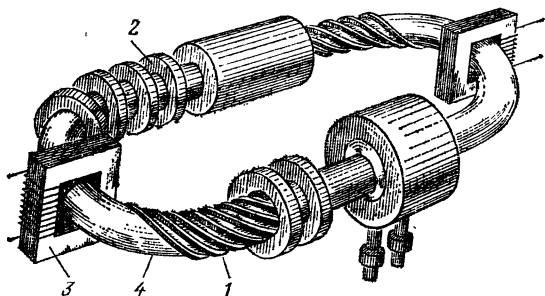


Рис. 4.7. Стелларатор «С»: 1 — винтовая обмотка; 2 — катушки продольного поля; 3 — трансформатор омического нагрева; 4 — вакуумная камера.

или узкие концы эллипса лежат под теми проводниками винтовой обмотки, в которых направление тока совпадает с направлением магнитного поля (если винтовая обмотка намотана по часовой стрелке). Если идти вдоль магнитного поля, эллипс или треугольник вращается вместе с винтовой обмоткой. Через каждую точку внутри камеры стелларатора проходит своя магнитная поверхность. Так что для плазмы образуется многослойная магнитная изоляция из вложенных одна в другую магнитных поверхностей.

На установке «В-65» и специально построенном небольшом стеллараторе «Этюд» с винтовой обмоткой были поставлены опыты, которые показали, что винтовая обмотка действительно позволяет получать прокручивание силовых линий и шир.

Затем начались опыты с плазмой. Результаты этих опытов убедили, что устойчивость плазмы с введением шира действительно улучшилась. Однако скорость ухода частиц все еще оставалась очень большой и поток примесей со стенки оставался значительным.

Одна из причин малого времени жизни плазмы заключалась просто в том, что в установках серии «В» диаметр вакуумной камеры был уж слишком мал — всего около 5 см. За то короткое время, которое требовалось частицам плазмы, чтобы пройти 1—2 см, отделявшие их от стенки, они просто не успевали нагреться до сколько-нибудь значительной температуры.

Все эти соображения заставили возобновить работы по проектированию более крупной установки — стелларатора «С». Стелларатор «С» представлял собой уже очень внушительных размеров машину — длина вакуумной камеры, имевшей как и у стелларатора «В-65» форму беговой дорожки стадиона — рейстрека, достигала 13,5 м. Диаметр плазмы был 20 см. Индукцию магнитного поля можно было поднимать до 3 Тл. Стелларатор был оборудован дивертором и антенной для нагрева ионов плазмы радиочастотным методом (рис. 4.7).

Начало сотрудничества

Как раз в это время, благодаря инициативе Советского Союза, завеса секретности над исследованиями по термоядерной проблеме была снята. В 1958 г. состоялась Вторая Международная конференция по мирному использованию атомной энергии под эгидой Организации Объединенных Наций. На этой конференции были доложены результаты исследований на стеллараторах серии «В». Стеллараторная программа вызвала большой интерес. Хотя многие проблемы оставались еще нерешенными, было ясно, что идея работоспособна и определенный прогресс в понимании поведения плазмы в стеллараторах явно был виден.

На следующей конференции, которая была уже прямо посвящена термоядерной программе — Первой Международной конференции по физике плазмы и УТС в Зальцбурге (Австрия) в 1961 г., по-прежнему доклады по стеллараторам содержали результаты, полученные только на американских установках — стеллараторах серии «В» и начало работы на стеллараторе «С».

Но работа по стеллараторной программе в других странах уже началась.

В Мюнхене (ФРГ) исследования удержания плазмы в стеллараторе начались с повторения американских экспериментов. Первый немецкий стелларатор был довольно мал, хотя и имел такую же, как стелларатор «С», фор-

му — рейстрека. Радиус закруглений был 35 см, вакуумная камера имела диаметр всего 4 см. Винтовое поле создавалось винтовой обмоткой из трех пар проводников. Ему, как и всем последующим немецким стеллараторам, было присвоено гордое название — «Вандельштейн-1», по имени самой высокой в ФРГ альпийской вершины.

Первые опыты на стеллараторе «Вандельштейн-1» были не слишком удачны — наблюдался удивительно быстрый уход плазмы из ловушки.

Немецким теоретикам Пфиршу и Шлютеру удалось разобраться в причинах повышения скорости потерь плазмы при изгибании трубы со стеллараторным полем. Правда, их теория годилась только для достаточно холодной плазмы, но в данном случае опыты как раз и велись с весьма холодной цезиевой плазмой.

Из теории Пфирша — Шлютера следовало, что винтовая обмотка с тремя парами проводников не обеспечивает нужной скорости прокручивания силовых линий магнитного поля. Ее решили заменить на двухзаходную винтовую обмотку из двух пар проводников. Новую установку назвали «Вандельштейн-1В», заодно переименовав старую в «Вандельштейн-1А».

Эксперименты на новой установке были более успешными. Потери плазмы из ловушки стали столь малы, что на их фоне была заметна даже дополнительная гибель плазмы на проволочке диаметром 0,1 мм, которая вводилась в плазму для измерения плотности. Эти результаты были доложены на Международной конференции по физике плазмы и УТС в 1965 г.

В Советском Союзе работы по стеллараторной программе начались в 1962 г. Первый в Советском Союзе стелларатор «Л-1» был построен в Физическом институте имени П. Н. Лебедева Академии наук СССР.

В отличие от американских и немецких стеллараторов, существовавших до этого времени, советский стелларатор был совершенно круглый — без прямолинейных участков — рейстреков. Проанализировав результаты немецких и американских работ, решено было сразу же отказаться от рейстреков, так как на переходном участке от закругленных частей к рейстрекам неизбежно возникают искажения магнитного поля, которые могут привести к ухудшению удержания плазмы.

Этот вывод был получен чисто теоретическим путем, до того как был построен стелларатор. Через три года, в 1965 г., к этому же выводу в результате экспериментов

на стеллараторе «Вандельштейн-1В» пришли немецкие ученые.

В это же время начались работы по стеллараторной программе в Харьковском физико-техническом институте. В 1964 г. здесь вступил в строй стелларатор «Сириус». Он имел форму рейстрека и трехзаходную винтовую обмотку. Изучение структуры магнитного поля в этом стеллараторе показало, что в нем действительно образуются замкнутые магнитные поверхности.

В 1965 г. в Англии состоялась Вторая Международная конференция по физике плазмы и УТС. На этой конференции было представлено много работ по стеллараторам. Американские ученые представили последние результаты, полученные на стеллараторе «С». Удержание плазмы в стеллараторе «С» по-прежнему было плохим. Более того, исследование зависимости времени удержания от температуры плазмы и величины магнитного поля дали результаты, соответствующие весьма пессимистической формуле $\tau = 4a^2 B/T$, где a — радиус плазмы, B — индукция магнитного поля, T — температура плазмы. Формула эта была предложена американским физиком Бомом. Падение времени удержания плазмы с увеличением температуры, предсказываемое формулой Бома, делало надежды на удачное осуществление термоядерного синтеза весьма сомнительными. Ведь температуру нужно было повышать еще по крайней мере в 100 раз, а время удержания плазмы в стеллараторе «С» и без того было в 1000 раз меньше, чем требуется.

Доложенные на этой же конференции результаты, полученные на советских стеллараторах «Л-1» и «Сириус», выглядели значительно лучше — время удержания плазмы в стеллараторе «Л-1» в несколько раз превышало время, вычисленное по формуле Бома. В стеллараторе «Сириус» время удержания плазмы при большой плотности было близко к расчетам по формуле Бома, но при уменьшении плотности плазмы время удержания возрастало. Успехи, достигнутые на советских стеллараторах, вдохновили заняться стеллараторами английских физиков. Для начала они решили проверить, действительно ли стелларатор представляет идеальную ловушку для удержания отдельных заряженных частиц? Для этого эксперимента они построили небольшой тороидальный стелларатор «Класп» с трехзаходной обмоткой. Для введения заряженных частиц в ловушку применили метод, который использовался для проверки удержания частиц в ловушке

с магнитными пробками; ловушка наполнялась газом из радиоактивного изотопа водорода — трития. Нейтральные атомы трития свободно проходили сквозь магнитное поле в ловушку, а образующиеся в процессе распада ядра трития и электроны захватывались магнитным полем. Заряженные частицы удерживались в ловушке на протяжении более чем 10 миллионов оборотов вокруг установки. Если бы плазма держалась в стеллараторе так же долго, как отдельные заряженные частицы, этого было бы достаточно для термоядерного реактора.

Успех этого эксперимента воодушевил английских ученых и они решили построить большой стелларатор — масштаба стелларатора «С», но чисто тороидальной формы без рейстрекров. Назвали его «Клео». Но не имея опыта работы со стеллараторами крупного масштаба и не рискуя начинать работы сразу с такого масштаба, решили сначала построить машину поменьше — «Протоклео», так называли они свою «малютку». Это был небольшой стелларатор с трехзаходной винтовой обмоткой, радиусом тора 40 см и радиусом плазмы 5 см.

В 1968 г. состоялась Третья Международная конференция по физике плазмы и УТС в Новосибирске. К этому времени, как мы видели, стеллараторная программа приобрела международный размах. Результаты экспериментов, представленные на этой конференции, можно было разделить на две группы: к одной из них относятся советские, немецкие, английские эксперименты, а к другой — американские.

В работах первой группы, выполненных на довольно маленьких установках, делались попытки понять физику удержания и нагрева плазмы в стеллараторах. Несмотря на весьма скромные параметры плазмы, достигнутые на этом этапе ($n \approx 10^{18} \text{ м}^{-3}$, $T \approx 200$ тысяч градусов), общий тон докладов звучал оптимистически.

На советском стеллараторе «Л-1» была получена четкая связь времени удержания плазмы со структурой магнитного поля. В этих экспериментах изучалась зависимость времени удержания плазмы от индукции винтового поля. При изменении тока в винтовой обмотке стелларатора изменялся угол прокручивания линий индукции магнитного поля. Время удержания плазмы возрастало с увеличением угла прокручивания, как и должно быть по теории.

А вот доклад о результатах экспериментов на лидере стеллараторного направления — американском стеллараторе

ре «С» — звучал довольно пессимистически. Время удержания плазмы в стеллараторе «С» по-прежнему следовало формуле Бома. Потери энергии были так велики, что даже с помощью дополнительного и очень мощного радиочастотного нагрева не удавалось получить температуру

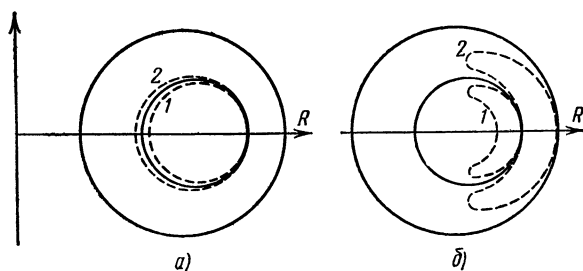


Рис. 4.8. Проекция траектории дрейфа заряженных частиц: а) пролетных; б) запертых. Частица описывает траектории 1 или 2 в зависимости от направления ее продольной скорости по отношению к направлению магнитного поля.

плазмы выше 1,5 миллионов градусов. А в соответствии с формулой Бома при дальнейшем повышении температуры потери должны еще больше возрасти.

Не менее пессимистически для стеллараторной программы прозвучали теоретические доклады. Советские теоретики А. А. Галеев, Р. З. Сагдеев и Л. М. Коврижных установили, что стеллараторы, так же как и любые другие ловушки тороидальной формы, не все частицы плазмы удерживают хорошо. Так как магнитное поле в такой ловушке неоднородно — где-то сильнее, а где-то слабее, внутри тора сами собой образуются небольшие ловушки типа пробкотрона, в которые могут попадаться некоторые частицы плазмы. Такая частица, запертая между двумя магнитными пробками, двигается взад и вперед между ними и не может, как другие частицы, обойти вокруг всего тора. Поэтому траектория запертых частиц отличается от траектории остальных частиц, и увь, не в благоприятную сторону.

Если смотреть вдоль тора, траектория запертой частицы похожа по форме на банан (рис. 4.8). Этот банан довольно далеко отходит от магнитной поверхности, по которой двигалась бы частица, если бы не была запертой. Казалось бы, ну банан, так банан, что тут страшного? Частица ведь все равно двигается по замкнутому пути и

никуда не уходит. Это действительно так, но только до тех пор, пока частице никто не мешает. Но, если произойдет столкновение с другой частицей, наша запертая частица начнет описывать новую траекторию из той же точки, где произошло столкновение, переместившись сразу на толщину банана. А так как банан может занимать заметную часть радиуса плазмы, запертые частицы могут покинуть плазму всего за несколько столкновений.

Этот механизм потерь частиц приводит к росту скорости потерь из стелларатора в несколько десятков раз. Точно также возрастает и скорость переноса тепла — ведь запертая частица, двигаясь по своей банановой траектории, переносит тепло из горячего центра плазмы к холодному краю.

В существовавших тогда установках роль запертых частиц не очень чувствовалась, но в пересчете на термоядерную плазму предсказания теории выглядели устрашающе. Дело в том, что количество запертых частиц зависит от частоты столкновений.

Частица попадает в разряд запертых только в том случае, когда она имеет достаточно малое отношение компоненты скорости вдоль магнитного поля v_{\parallel} к скорости, направленной поперек магнитного поля v_{\perp} :

$$\frac{v_{\parallel}}{v_{\perp}} < \sqrt{\frac{B_{\max} - B_{\min}}{B_{\min}}},$$

а число их

$$\frac{N_{\text{зап}}}{N_{\text{голл}}} = \sqrt{\frac{B_{\max} - B_{\min}}{B_{\max}}}.$$

Это то же самое условие, что и в ловушке с магнитными пробками (см. гл. III). Только там такие частицы нас радовали, ибо именно они и удерживаются в ловушке с магнитными пробками, а в стеллараторе наоборот, такие частицы попадают в разряд запертых и быстро уходят.

К счастью, в стеллараторе изменение магнитного поля невелико. Максимальное поле B_{\max} и минимальное B_{\min} отличаются от среднего всего на несколько процентов, так что отношение $(B_{\max} - B_{\min})/B_{\min}$ обычно около 0,1. Тогда частица попадает в разряд запертых, если для нее $v_{\parallel}/v_{\perp} < \sqrt{0,1} \approx 0,3$. Число запертых частиц тоже около 0,3.

При каждом столкновении отношение v_{\parallel}/v_{\perp} изменяется. Поэтому запертая частица после столкновения

может перестать быть запертой и благополучно полетит себе вокруг тора, не успев описать свой банан.

При большой частоте столкновений запертые частицы остаются запертыми столь короткое время, что от бананов почти ничего не остается и повышенные потери из-за запертых частиц практически не ощущаются.

Частота столкновений падает с повышением температуры. Поэтому при переходе от 100 тысяч градусов, при которых велись опыты с плазмой в то время, к 100 миллионам градусов в термоядерном реакторе, частота столкновений упадет в десятки тысяч раз. Так что предсказание банановой катастрофы для стеллараторов выглядело достаточно грозно.

Зато у соседей — благодать!

На этой же самой конференции, проходившей в Новосибирске, настоящей сенсацией прозвучали великолепные результаты, полученные советскими учеными, развивавшими родственное стеллараторам направление — токамаки.

Структура магнитного поля токамака очень близка к стеллараторной. Разница только в том, что прокручивание силовых линий магнитного поля достигается не с помощью внешней винтовой обмотки, а с помощью тока, который течет прямо по плазме. При этом образуются такие же замкнутые магнитные поверхности, что и в стеллараторе.

Конструкция токамака гораздо проще, чем стелларатора. Для токамака нужно только самое простое тороидальное магнитное поле, плазма и ток. Отсюда и название «токамак» — ток, камера, магнитные катушки. Раньше всегда считали, что удержание плазмы в токамаке должно быть хуже, чем в стеллараторе, так как если с плазмой что-нибудь случится, немедленно изменится ток, а вместе с ним и структура удерживающего плазму магнитного поля. Зная коварный характер плазмы, нетрудно предсказать, как плазма использует предоставленную ей возможность управлять своим собственным удержанием — конечно же быстро ударит на стенку.

В первые годы исследований на токамаках так оно и было. Но академик Л. А. Арцимович — руководитель этих работ говорил по этому поводу «зато конструкция токамака гораздо проще и разобраться в поведении плазмы в нем легче, чем в стеллараторах» и эксперименты на

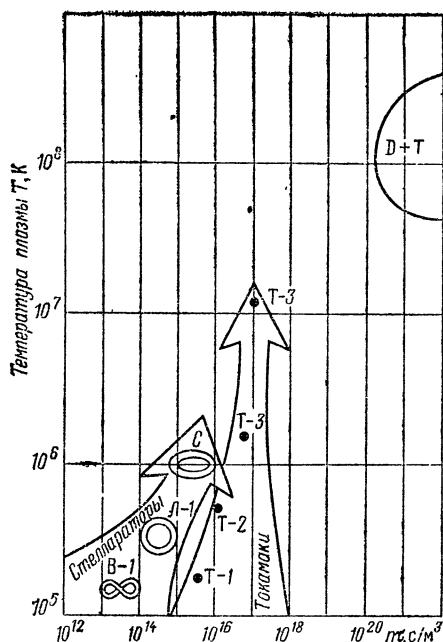


Рис. 4.9. Вот так выглядела ситуация к 1969 г.

токамаках продолжались несмотря ни на что. Но об этом подробнее мы расскажем в следующей главе.

Сейчас для нас важно узнать, что терпение и настойчивость «токамачников» в борьбе с коварной плазмой было вознаграждено. На конференции в Новосибирске в 1968 г. они доложили, что им удалось наконец преодолеть «радиационный барьер», когда почти вся вложенная энергия уходила на излучение примесей. Они научились получать разряд с гораздо меньшим количеством примесей, и температура плазмы начала расти. По измерениям советских ученых на токамаке «Т-3» температуру плазмы удалось поднять до 10 миллионов градусов! Это было почти в 10 раз больше, чем наилучшие достижения на стеллараторах (рис. 4.9).

Для стеллараторного направления это был страшный удар.

Американским ученым очень не хотелось в это верить. На конференции разгорелась дискуссия о методах измерения температуры и других параметров плазмы. Американцам так хотелось найти ошибку в измерениях

советских ученых! Но ошибку найти не удалось. После конференции для работы на токамаке «Т-3» были приглашены английские ученые. Перед ними была поставлена задача измерить независимо от советских ученых самый волнующий параметр — температуру плазмы. И вот в 1969 г. появилась совместная работа советских и английских ученых. Лазерные измерения, проведенные ими, подтвердили измерения советских ученых, сделанные ранее другими методами. Температура плазмы в токамаке иногда даже превышала 10 миллионов градусов! Этот результат произвел особенно большое впечатление на руководство американской термоядерной программы. Немедленно были приняты меры с чисто американским размахом и решительностью — все работы по стеллараторам в США были прекращены. А самый крупный стелларатор «С» решено было переделать в токамак.

ГЛАВА V

ТОКАМАК

Рождение идеи токамака произошло в результате своеобразного круговорота идей. Точнее мысль развивалась по спирали в точном соответствии с тем, как учит нас диалектика. Уже в первых теоретических работах, положивших начало исследованиям по управляемому термоядерному синтезу в СССР, где впервые был сформулирован принцип магнитного удержания плазмы, был рассчитан проект термоядерного реактора, удивительно близкий к реальному термоядерному реактору-токамаку, к которому наука пришла только сейчас, после 30-летних исследований.

В 1951 г., когда были сделаны эти расчеты, реактор представлялся в виде тора большого радиуса $R=12$ м, радиус плазмы $a=2$ м. Плазму должно было удерживать магнитное поле с индукцией до 5 Тл. Чтобы устранить дрейф частиц в тороидальном поле и заодно нагреть плазму, предлагалось пропускать вдоль тора прямо по плазме электрический ток.

Как мы знаем теперь, магнитное поле этого тока обеспечивает прокручивание силовых линий и действительно решает проблему дрейфа частиц в тороидальном поле. Поэтому такой реактор, если бы его отважились тогда построить, мог бы работать! Во всяком случае время удержания плазмы в нем было бы достаточно велико. Правда,

в то время не было известно нужное соотношение между величинами тока и магнитного поля. Кроме того, предложение ориентировалось на реакцию $D+D$, а не $D+T$. И вообще в то время о плазме было известно так мало, что строить сразу такую огромную и дорогую установку никто, конечно, решиться не мог, и этот проект рассматривался не более как иллюстрация к основной идее магнитного удержания.

Идея пропускания тока прямо по плазме естественно привела к идее самосжатого разряда (см. гл. II), которая на первых порах казалась гораздо проще и потому привлекательной. Основные усилия в первые годы исследований по управляемому термоядерному синтезу были прикованы именно к ней.

После того как из-за неустойчивости самосжатых разрядов в них разочаровались, возникла идея вновь обратиться к помощи внешнего магнитного поля, теперь уже как средства для борьбы с неустойчивостью плазменного шнура.

В 1952 г. В. Д. Шафрановым было найдено условие, при котором разряд может быть стабилизирован магнитным полем. После снятия секретности с работ по термоядерной проблеме выяснилось, что аналогичное условие нашел независимо от В. Д. Шафранова английский физик Крускал. С тех пор это условие устойчивости называется критерием Шафранова — Крускала. Мы уже упоминали о нем на с. 71.

Значение стабилизирующего продольного магнитного поля B_0 нужно выбирать в зависимости от размеров плазмы и магнитного поля B_i , созданного текущим по плазме током,

$$B_0 > B_i \frac{R}{a}$$

или, другими словами, отношение $B_0 a / B_i R = q$ должно быть больше 1. Величина q так и называется — запас устойчивости и играет важную роль в физике удержания плазмы в токамаках.

Эксперименты, выполненные под руководством И. Н. Голловина и Н. А. Явлинского, по стабилизации прямых разрядов продольным магнитным полем показали, что эффект стабилизации действительно есть. Теперь главное было поднимать температуру плазмы. Но этому мешали огромные потери тепла, в частности, из-за переноса тепла вдоль разряда на торцевые электроды. Для устранения

этих потерь естественно было перейти к тороидальному разряду.

Но здесь исследователей ожидала еще одна неприятность.

Баллонный эффект

Автомобильные баллоны имеют такую же форму, как и тороидальная камера токамака, и все шоферы давно уже знают, что при накачке баллона давление воздуха растягивает резину на внешнем обводе баллона гораздо сильнее, чем на внутреннем. В результате большой радиус баллона увеличивается.

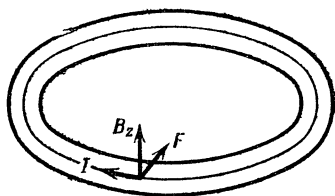


Рис. 5.1. На ток, текущий по плазме, в поперечном магнитном поле действует сила, компенсирующая баллонный эффект.

Причина этого эффекта очень проста — площадь внешнего обвода больше, значит и сила, создаваемая давлением газа на него, тоже больше.

В случае автомобильного баллона эта сила компенсируется упругостью резины. А вот в случае плазмы нужно что-то изобрести для компенсации баллонного эффекта, иначе тороидальный плазменный шнур будет растягиваться и растягиваться, пока не разорвется.

Для решения баллонной проблемы довольно быстро было найдено целых два решения. Г. И. Будкер предложил наложить на плазменный виток еще одно внешнее магнитное поле B_z , направленное вдоль оси тора (рис. 5.1). Взаимодействие этого поля с током, текущим по плазме, создает силу, направленную к центру плазменного шнура. Если должным образом подбирать величину поперечного поля, эта сила может как раз компенсировать баллонный эффект.

Второе предложение состояло в том, что плазменный виток нужно окружить проводящим медным кожухом. При любом движении плазменного витка в медном кожухе возникнут вихревые токи, которые создадут силы, как раз достаточные, чтобы вернуть его обратно (рис. 5.2). К сожалению, из-за не равного нулю сопротивления вих-

ревые токи в меди постепенно затухают и стабилизирующий эффект медного кожуха со временем пропадает. Длительность стабилизации зависит от толщины медного кожуха. При сооружении первых установок выбор был сде-

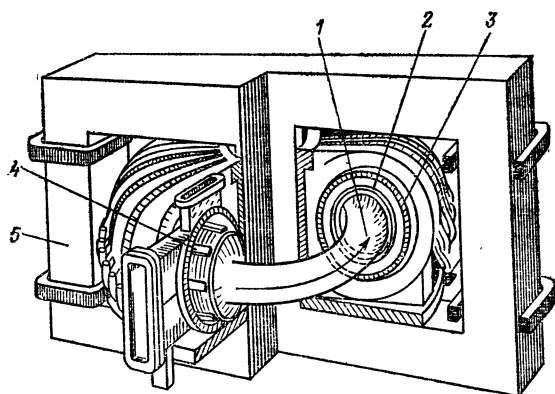


Рис. 5.2. Схематический рисунок установки токамак: 1 — плазма; 2 — камера из нержавеющей стали; 3 — медный кожух; 4 — обмотка поперечного поля; 5 — трансформатор для возбуждения тока в плазме.

лан в пользу медного кожуха, так как длительность разряда в них исчислялась тысячными долями секунды и медный кожух толщиной в несколько сантиметров обеспечивал достаточно длительный стабилизирующий эффект.

Детство

Первый токамак был построен в 1956 г. Он еще даже не назывался токамак, а «ТМП» — торойд в магнитном поле. На нем с огромным трудом удалось получить разряд. Основная трудность была связана с прямо-таки неистовым излучением примесей, уносившим из плазмы всю вкладываемую мощность. Температуру плазмы в этих условиях никакими силами не удавалось поднять выше нескольких сот тысяч градусов. Чтобы двигаться дальше, надо было преодолеть этот радиационный барьер.

Естественно, прежде всего посмотрели с помощью спектрографа, что же так ярко светится в плазме. Оказалось — кремний. Дело в том, что вакуумная камера первого

токамака была сделана из фарфоровой трубы. Кремний поступал в разряд из-за испарения фарфора. В этих экспериментах было найдено решение проблемы вакуумной камеры. И решение столь удачное, что оно применяется на всех токамаках и до сегодняшнего дня. Вакуумную камеру стали делать из нержавеющей стали (рис. 5.2). Нержавеющая сталь имеет довольно большое электрическое сопротивление. Поэтому если для изготовления камеры взять очень тонкую нержавеющую сталь (толщина стенок может быть несколько десятых долей миллиметра), то камеру можно делать сплошной без разрезов.

При этом образуется замкнутый виток, но из-за большого сопротивления ток по нему течет гораздо меньший, чем по плазме, и трансформатору это не страшно.

Токамак-1

Установка с камерой из нержавеющей стали называлась уже Токамак-1. Но по иронии судьбы первые эксперименты на этой установке чуть было не увели всю программу с пути токамаков.

Дело в том, что в начале 1958 г., как раз когда в строй вступил Токамак-1, были опубликованы результаты исследований на английской установке «Зета». «Зета» — это очень крупная установка, в которой происходил замкнутый самосжатый разряд в слабом магнитном поле. Благодаря стабилизации разряда магнитным полем англичанам удалось получить неплохие результаты. Во всяком случае гораздо более впечатляющие, чем на первом токамаке «ТМП». А так как геометрия установки Токамак-1 в общем ничем не отличалась от «Зеты» — та же замкнутая вакуумная камера с мощным трансформатором в середине, возник соблазн попробовать воспроизвести результаты «Зеты». Попробовали. Это оказалось совсем нетрудно. Достаточно было снизить магнитное поле в несколько десятков раз. При этом получили примерно такие же результаты, что и на «Зете». Но, в отличие от «Зеты», на Токамаке-1 магнитное поле можно было сильно увеличить. Сделали. Этот опыт убедил, что в сильном магнитном поле разряд более устойчив, чем в слабом.

Эти опыты дали еще один важный результат — было получено первое совпадение с предсказаниями теории. А именно, переход к сильному магнитному полю означал увеличение запаса устойчивости q . Оказалось, что как только получается $q > 1$, устойчивость разряда действитель-

но резко улучшается — в соответствии с критерием Шэфрана — Крускала.

Однако радоваться было еще рано. Температура плазмы и с камерой из нержавеющей стали все равно была довольно низка. И вкладываемая мощность по-прежнему уносилась из плазмы излучением примесей. Только примеси стали другими. Спектроскопия показала, что теперь в плазме полно кислорода и углерода. С чего бы это? Ведь если заглянуть в справочники, нержавеющая сталь состоит из железа, никеля, хрома и т. п. Про кислород и углерод в справочниках не говорится ни слова.

Ситуацию разъяснили специалисты по вакуумной технике. Оказывается, на поверхности любого металла всегда имеется слой молекул посторонних веществ — кислорода, азота, углекислого газа, воды. Это явление давно известно и называется адсорбцией.

Адсорбированные молекулы удерживаются на поверхности твердого тела силами молекулярного притяжения. Когда поверхность твердого тела контактирует с воздухом, всевозможные молекулы, входящие в состав воздуха, сталкиваются с поверхностью металла и прилипают к ней.

Силы притяжения молекул к поверхности твердого тела довольно велики. Удалить адсорбированные молекулы можно, если нагреть тело до температуры в несколько сот градусов Цельсия. Такая техника обезгаживания широко применяется, например, при производстве электронных ламп.

С подобной же проблемой боролись в это время и представители стеллараторного направления. На стеллараторе «В-1» вакуумную камеру прогревали в вакууме до температуры 450° С. В результате поток атомов кислорода и углерода в плазму удалось снизить почти в 100 раз.

Для еще большего снижения поступления примесей в плазму на стеллараторе «В-1» использовали диафрагму — пластину, перегораживающую вакуумную камеру поперек. Отверстие в диафрагме ограничивает диаметр разряда таким образом, чтобы плазма не касалась стенок вакуумной камеры, а взаимодействовала только с диафрагмой. Площадь поверхности, на которую воздействует плазма, резко уменьшается и соответственно снижается поступление примесей (рис. 5.3).

Благодаря наладившемуся к этому времени международному сотрудничеству и обмену информацией в области исследований по термоядерной проблеме этот опыт, добытый в экспериментах на стеллараторах, был исполь-

зован на токамаках. В 1959 г. была построена установка токамак «Т-2» с камерой из нержавеющей стали, которую можно было прогревать до 450°C , и с диафрагмой.

Такие меры привели к резкому снижению количества примесей и мощности их излучения. Но при этом обнаружилась новая беда — плотность плазмы стала падать в течение разряда.

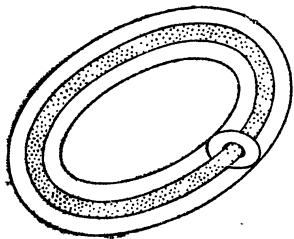


Рис. 5.3. Диафрагма ограничивает диаметр плазменного шнура.

Спектральные измерения показали, что теперь плазма, действительно, в основном состоит из водорода — плотность примесей кислорода и углерода составляет 5—10%. А водородные ионы, покидающие плазму, прилипают к стенкам вакуумной камеры, и плотность плазмы падает. Раньше, когда камера была достаточно грязной, каждый упавший на нее ион водорода, выбивал с ее поверхности атом водорода, кислорода или углерода. В результате плотность плазмы во время разряда не только не падала, а даже возрастала, и к концу разряда плотность плазмы оказывалась гораздо выше, чем плотность водорода, напущенного в камеру перед началом разряда.

Теперь с чистой камерой все стало наоборот — плотность плазмы к концу разряда была ниже начальной плотности водорода. Более того, давление водорода после окончания разряда, когда все ионы плазмы нейтрализовались и снова превратились в атомы, все равно получалось почти в 10 раз меньше давления перед разрядом!

Ну с этой бедой бороться было не так трудно. На камеру установили клапан и стали добавлять водород в течение разряда, чтобы плотность плазмы не падала, а даже росла. Для стабилизации и управления положением плазмы в камере токамак снабдили несколькими корректирующими обмотками.

Весной 1962 г. на новой установке токамак «ТМ-2», имеющей наконец все элементы полноценного токамака, К. А. Разумовой и Е. П. Горбунову удалось получить плазменный шнур, который сохранял устойчивость до конца разряда целых две тысячных доли секунды! Устойчивые разряды получались лишь при самом большом значении магнитного поля — 2,2 Тл и при достаточно малом токе. Запас устойчивости (величина η , помните?) дол-

жен быть около 8. Это вместо 1 по критерию Шаффранова — Крускала. Но все-таки устойчивые разряды получались! Это был огромный успех.

При попытке увеличить разрядный ток и, соответственно, снизить значение q до 4–6 в разряде возникала

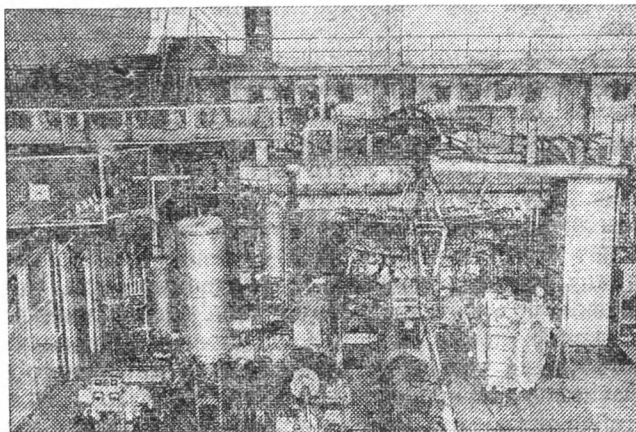


Рис. 5.4. Общий вид установки токамак «Т-4».

неустойчивость, названная авторами неустойчивостью срыва. Эта неустойчивость, как дамоклов меч, висит над головами токамачников до сих пор.

Неустойчивость срыва внешне проявляется в том, что плазма вдруг резко вспыхивает, электрическое напряжение на разряде в этот момент падает. Вспышки эти очень короткие — около одной десятитысячной доли секунды. Между вспышками плазма ведет себя спокойно. В момент срыва, как показывает спектроскопия, резко возрастает взаимодействие плазмы с диафрагмой и стенками камеры, и в плазму поступает со стенок водород и атомы примесей.

Разобраться в механизме неустойчивости срыва оказалось довольно трудно. До конца он не выяснен еще и теперь — 20 лет спустя. А в то время, раз нельзя было понять причины срывов, нужно было научиться хотя бы их избегать.

Для расширения фронта работ было построено еще несколько токамаков. Среди них выделился токамак «Т-3», который после ряда модернизаций («Т-3А», «Т-4») работал до 1978 г. (рис. 5.4).

Работа на токамаке, по образному выражению одного из основных ее участников В. С. Стрелкова, напоминала плавание на парусной лодке по бурному морю. Множество опасностей подстерегало экспериментатора со всех сторон. Плазма бурно реагировала на малейшие изменения условий эксперимента, и отыскивать островки стабильности среди бурного моря неустойчивостей было чрезвычайно трудно.

В это же время интенсивно развивалась теория неустойчивостей плазмы в токамаке. Вскоре количество теоретически предсказанных неустойчивостей стало исчисляться десятками. Появилась необходимость в классификации: неустойчивости стали делить на классы и виды, подобно тому, как это делается в зоологии.

Самый опасный класс неустойчивостей, когда плазма приходит в движение целиком и словно выплескивается на стенку, называли магнитно-гидродинамическим. Потому, что плазма в этом случае ведет себя словно жидкость и ее движение можно описать уравнениями гидродинамики но, конечно, с учетом действия на нее магнитного поля.

Магнитно-гидродинамические, или для краткости МГД-неустойчивости,— это старые знакомые, которые мучили физиков еще в опытах с самосжимающимися разрядами — пинчами (см. гл. II).

Если, например, ток, текущий по плазме, слишком велик и нарушается условие Шафранова — Крускала ($q > 1$), возникает винтовая МГД-неустойчивость. Плазменный шнур из прямого делается винтообразным и, если вакуумная камера, в которой происходит разряд, недостаточно велика, шнур может коснуться стенки со всеми вытекающими отсюда последствиями, которые мы с вами уже прекрасно знаем.

Дальнейшее развитие теории МГД-неустойчивостей применительно к токамакам показало, что винтовая неустойчивость возникает не только при $q=1$, но вообще всякий раз, когда q равно целому числу m или даже отношению двух целых чисел m/n . Только в этом случае получается винт с m заходами, имеющий n периодов на окружности тора (рис. 5.5).

В разрезе этот винт принимает форму цветка с лепестками (рис. 5.6). В прямом цилиндрическом разряде эти лепестки располагались бы по окружности равномерно. А при сгибании цилиндра в тор лепестки на внешнем обводе тора расходятся, а на внутреннем сходятся, и цветок становится несимметричным.

Вся эта красивая теория возникла потом для объяснения экспериментов. Удивительные превращения плазмы в винты и цветы сначала обнаружили экспериментально. Винтовую форму поверхности плазмы обнаружили в токамаке «ТМ-2» Н. Д. Виноградова и К. А. Разумова. Они

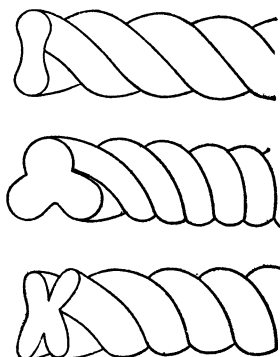


Рис. 5.5. Плазма принимает форму двух-, трех-, четырехзаходного винта.

фотографировали разряд с помощью скоростной камеры и обнаружили винтовые возмущения с $m=3$. Лепестки перемещались по поверхности плазмы, пробегая перед окном, через которое на плазму смотрела

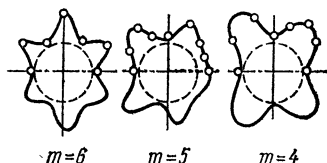


Рис. 5.6. Возмущения магнитного поля, вызванные развитием винтовых мод в начальной стадии разряда.

кинокамера. В глубине плазмы иногда, незадолго до срыва, можно было различить еще один винт с $m=2$.

Более подробные исследования винтовых неустойчивостей в токамаке были проведены на токамаке «Т-3» С. В. Мирновым и И. Б. Семеновым. Они использовали для этого магнитные зонды — крохотные катушечки из нескольких витков провода. С помощью такой катушечки можно измерять магнитное поле плазменного тока. Теперь эти катушки так и называют — катушки Мирнова. Несколько десятков таких катушечек располагали на внешней поверхности тора. Сравнивая сигналы, возбуждаемые током в плазме в разных катушках, можно было судить о силе тока вблизи каждой из них, и, таким образом, воссоздать картину распределения тока по сечению шнура. Точки на рис. 5.6 как раз и представляют собой результаты измерений сигналов с катушек Мирнова.

Измерения показали, что сечение плазменного шнура действительно принимает форму цветка с различным числом лепестков. Величина q обратно пропорциональна плазменному току; $q=5 \cdot 10^6 B_0 a^2 / IR$. Поэтому в начале разряда, когда $I=0$, q формально равно бесконечности. По мере

увеличения тока величина q постепенно уменьшается, проходя последовательно через целые числа. При этом каждый раз возникает соответствующая винтовая мода, так что сечение плазмы в разрезе принимает форму шести-, пяти-, четырехлепесткового цветка.

Экспериментаторы обнаружили, а потом теоретики подтвердили, что хороший устойчивый разряд можно получить только, если подобрать ток в плазме так, чтобы цветка не получилось, т. е. q не должно быть равно целому числу.

В результате всех этих работ таинственное до тех пор поведение плазмы несколько прояснилось. Заканчивая обзор теоретических работ, на Второй Международной конференции по физике плазмы и УТС в Англии в 1965 г. академик Б. Б. Кадомцев сказал: «показались контуры берегов того огромного озера неустойчивости, которое раньше вообще казалось безбрежным океаном». Однако параметры плазмы, достигнутые в эксперименте, все еще оставались довольно низкими. Хотя с самыми грубыми неустойчивостями плазмы научились бороться, нельзя было сказать, что поведение плазмы контролируется экспериментаторами полностью. Из-за малейших неточностей в подборе управляющих магнитных полей, недостаточной очистки вакуумной камеры, а то и вообще по непонятным причинам потери энергии из плазмы оставались довольно большими. Несмотря на сотни тысяч ватт вкладываемой мощности, плазму удавалось нагреть только до температуры в несколько миллионов градусов. Время жизни энергии в плазме составляло около одной тысячной доли секунды. Эта величина в несколько раз превосходила время жизни, предсказываемое печально знаменитой формулой Боба.

Через три года на Третьей Международной конференции по физике плазмы и УТС, проходившей в Новосибирске, наступил триумф токамаков.

Кропотливая работа по поиску островов устойчивости плазмы, тщательному подбору значения магнитного поля, очистке и обезгаживанию стенок вакуумной камеры закончилась феноменальным успехом — на токамаке «Т-3» была получена плазма с плотностью $5 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$ — всего лишь в 2 раза меньше, чем нужно для термоядерного реактора. Температура электронов достигла восьми миллионов градусов, а ионов — пяти миллионов градусов.

Плазма с такими параметрами получалась в разряде с током 120 кА, при значении магнитного поля 3,7 Тл.

Время жизни горячей плазмы достигло одной сотой доли секунды. Из этих данных следовало, что потери тепла в токамаке «Т-3» в 30 раз меньше, чем должно быть по формуле Бома. Кроме того, зависимости теплопроводности плазмы от температуры и магнитного поля тоже формуле Бома не соответствовали.

Это означало, что в токамаке «Т-3» получена спокойная плазма, к которой формула Бома, описывающая поведение турбулентной плазмы, не имеет никакого отношения. Этот результат находился в разительном противоречии с результатами, полученными на самой крупной американской установке — стеллараторе «С», где по-прежнему никакие ухищрения экспериментаторов не позволили сколько-нибудь существенно оторваться от формулы Бома.

На этой же конференции были доложены результаты, полученные на немецком стеллараторе «Вандельштейн-2А». Для очень холодной бариевой плазмы с температурой около двух тысяч градусов немецкие ученые получили время жизни плазмы почти в 10 раз превышающее время, предсказываемое формулой Бома.

Это позволило академику Л. А. Арцимовичу, возглавлявшему советскую делегацию, суммировать итоги конференции в оптимистическом ключе. Он сказал, что главный итог экспериментов на замкнутых ловушках состоит в том, что «мы оторвались от мрачного призрака громадных потерь, воплощенного в формуле Бома, и открыли путь для дальнейшего повышения температуры плазмы с выходом на физический термоядерный уровень».

ГЛАВА VI

ПРОБЛЕМА НАГРЕВА

Каждой домохозяйке свой токамак!

После триумфа токамака «Т-3» мода на токамаки прочно захватила все плазменные лаборатории мира. Во всех странах, где велись исследования по термоядерному синтезу, срочно строились токамаки.

Первым из токамаков, строившихся за пределами Советского Союза, вступил в строй токамак «ST» в Принстоне (США). При его сооружении были использованы многие узлы стелларатора «С». Поэтому его и удалось построить так быстро. Эксперименты на токамаке «ST» начались в 1970 г., а уже через год на очередной Междуна-

родной конференции по физике плазмы и УТС в Мэдисоне были доложены результаты.

По своим размерам и конструкции токамак «ST» был полностью подобен советскому токамаку «Т-3». Свою основную задачу американские физики видели в том, чтобы воспроизвести результаты, полученные на токамаке

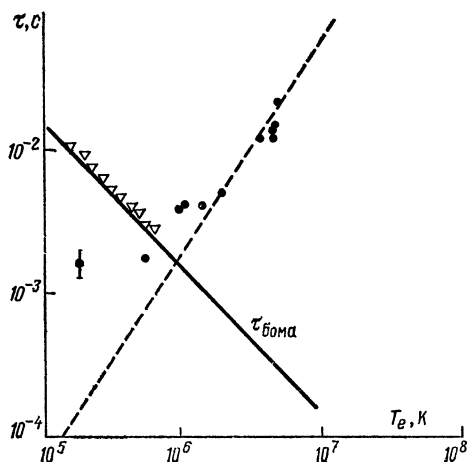


Рис. 6.1. Сравнение зависимости времени удержания плазмы от температуры в стеллараторе «С» и в токамаке «ST»: ∇ — стелларатор «С», \bullet — токамак «ST».

«Т-3». И, надо сказать, им это вполне удалось. Впервые в истории термоядерных исследований данные, независимо полученные на двух установках, так хорошо совпали.

Это означало, что физики наконец-то научились измерять характеристики плазмы и даже иногда управлять ею.

В экспериментах на токамаке «ST» американские физики собственными руками получили данные, опровергающие столь почитаемую ими раньше формулу Бома. Зависимость времени жизни частиц от температуры плазмы оказалась прямо противоположной формуле Бома — с увеличением температуры время удержания частиц в токамаке «ST» быстро возрастало, а формула Бома предсказывала, что оно должно уменьшаться (рис. 6.1).

Эксперименты, выполненные на плеяде советских токамаков «ТМ-3», «Т-3А», «Т-4», позволили академику Л. А. Арцимовичу вывести свою знаменитую формулу,

по которой можно рассчитать температуру ионов в токамаке, если заданы его размеры, значение магнитного поля, плотность плазмы и сила тока в ней.

На рис. 6.2 показана температура ионов, рассчитанная по формуле Арцимовича и измеренная в экспериментах на токамаках «ТМ-3», «Т-3А» и «Т-4».

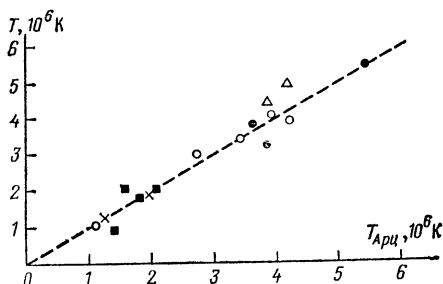


Рис. 6.2. Сравнение температуры ионов в различных токамаках с температурой, рассчитанной по формуле Арцимовича.

Столь хорошее совпадение теории с экспериментом, а также повторяемость результатов, продемонстрированная при сравнении экспериментов на токамаках «Т-3» и «ST», показали, что поведение плазмы наконец-то стало в некоторой степени понятным.

Пользуясь найденными в этих экспериментах закономерностями, ученые попытались прикинуть значения тех условий, при которых в токамаке можно было бы получить плазму с термоядерной температурой и плотностью.

Оказалось, что несмотря на благоприятную зависимость времени удержания плазмы от температуры и плотности, достижение термоядерной температуры в 100 миллионов градусов с помощью одного лишь токового нагрева в токамаке вряд ли возможно.

Дело в том, что электрическое сопротивление плазмы быстро падает при возрастании ее температуры. В соответствии с законом Джоуля — Ленца количество теплоты, выделяющееся в плазме при протекании по ней тока, пропорционально сопротивлению: $Q = I^2 R t$. Поэтому с повышением температуры плазмы при протекании того же самого тока в плазме выделяется все меньше тепла. А потери тепла из плазмы растут. Если даже считать, что плазма идеально очищена от примесей, то она все равно будет испускать рентгеновские лучи при столкновениях электронов с ионами. Потери энергии на это излучение

сравниваются с выделением тепла в плазме уже при температуре плазмы около 20 миллионов градусов, и температура перестает расти.

Увеличить силу тока, чтобы все-таки повысить температуру плазмы, нельзя, так как нарушится критерий устойчивости Шафранова — Крускала. А если плазма теряет устойчивость, то получится не нагрев, а полное охлаждение из-за контакта плазмы со стенками. Ток, правда, можно увеличить и при этом не нарушить критерий Шафранова — Крускала, если одновременно увеличить магнитное поле. Ведь в критерий Шафранова — Крускала входит отношение тока в плазме к магнитному полю: I/B . Увеличивая B , можно во столько же раз увеличить I , не изменяя их отношения. Расчеты показывают, что таким путем можно довести температуру плазмы до вожаделенных 100 миллионов градусов, но для этого значение магнитного поля должно быть очень большим — около 16 Тл.

Такие магнитные поля и даже в несколько раз более сильные давно уже умеют получать в лабораториях. Но для термоядерной установки такое магнитное поле нужно получить в довольно значительном объеме. Эта задача не из простых. Но нашлись энтузиасты и для этого направились.

Благодаря энтузиазму профессора Массачусетского технологического института Коппи в этом институте был построен токамак с сильным полем, названный им «Алкатор». Размеры «Алкатора» были даже немного меньше, чем у советского токамака «Т-3». Но значение магнитного поля могло достигать 9 Тл — почти в 3 раза больше, чем в токамаке «Т-3».

Соответственно, и силу тока в плазме можно было повышать не опасаясь неустойчивости плазмы. Большая мощность нагрева позволила получить в токамаке «Алкатор» плазму рекордной плотности до 10^{21} м⁻³. А так как время удержания плазмы растет с увеличением плотности, на установке «Алкатор» удалось достичь рекордного значения произведения $n\tau_E = 3 \cdot 10^{19}$ с/м³. Это всего лишь в несколько раз меньше заветного значения $n\tau_E \approx 2 \cdot 10^{20}$ с/м³, которое нужно для термоядерного реактора согласно критерию Лоусона. Правда, температура плазмы в этих экспериментах получалась невысокая — около 10⁷ К. Так что для достижения термоядерных условий на этой установке тоже нужны, кроме тока в плазме, какие-то другие дополнительные методы нагрева.

Как греть плазму?

Поиск методов нагрева плазмы, удерживаемой в замкнутых магнитных ловушках, ведется непрерывно на протяжении всей истории термоядерных исследований.

Еще в 1950 г. изобретатель стеллараторов Л. Спитцер предложил для нагрева плазмы в них метод «магнитной накачки». Метод заключается в том, что в одном месте трубы стелларатора делается дополнительная обмотка, с помощью которой можно возбуждать переменное магнитное поле. Давление этого дополнительного поля сжимает плазму и выталкивает ее вдоль трубы в невозмущенную область (рис. 6.3).

Так как ловушка замкнутая, ускоренная часть плазмы, обойдя всю установку, возвращается снова в область, где находится обмотка. Если подобрать частоту переменного тока в обмотке так, чтобы именно в этот момент сила тока в обмотке снова достигла максимума, новый толчок еще больше ускорит плазму. И так далее. Благодаря такому резонансу энергия магнитного поля будет переходить в энергию движения плазмы.

Из-за столкновений частичек плазмы между собой направленные движение будет постепенно переходить в хаотическое, т. е. кинетическая энергия движения плазмы перейдет в тепловую.

Испытывался этот метод в начале 60-х годов на стеллараторе «С», но оказался недостаточно мощным, чтобы покрыть потери тепла из-за плохого удержания плазмы в этом стеллараторе. Позже на токамаке «Петула» в Гренобле (Франция) был сделан эксперимент по нагреву плазмы методом «магнитной накачки». Эксперимент оказался удачным — температура плазмы возросла на 50 тысяч градусов в ответ на каждый киловатт поглощенной плазмой мощности «накачки». А всего температуру ионов в этом эксперименте удалось поднять на 600 тысяч градусов — с 2 до 2,6 миллионов градусов. По сравнению с другими методами, о которых речь впереди, метод «магнитной накачки» имеет ряд достоинств — высокая эффективность нагрева, очень удобный диапазон частот 150—

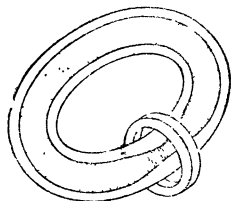


Рис. 6.3. Нагрев плазмы методом магнитной накачки.

200 кГц, где имеются мощные генераторы, хорошо освоенные промышленностью. Но есть и один существенный недостаток — для ввода мощности внутри вакуумной камеры приходится располагать сложную антенну с большим числом витков, охватывающих плазменный шнур. Поэтому для работы в будущем термоядерном реакторе этот метод не годится.

Адиабатическое сжатие

Другой метод, тоже родившийся достаточно давно, — адиабатическое сжатие плазмы. Адиабатическое — это значит достаточно быстрое для того, чтобы энергия сжатия не успела уйти из плазмы. В принципе

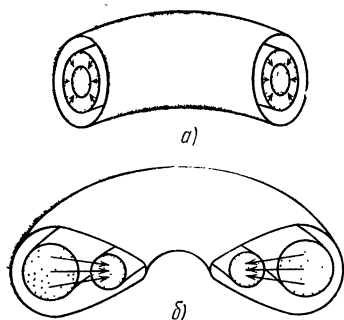


Рис. 6.4. Адиабатическое сжатие плазмы.

он похож на метод «магнитной накачки», только там переменная часть магнитного поля дает небольшую добавку к основному полю, которое остается постоянным. Поэтому плазма при «магнитной накачке» сжимается и расширяется не намного, но зато много-много раз.

При адиабатическом сжатии плазма сжимается один раз, но зато очень сильно. Здесь уже основное, удерживающее плазму магнитное поле, делается переменным.

Оно быстро возрастает во времени. Причем изменение поля очень велико — за тысячные доли секунды поле возрастает в несколько раз.

Сжатие плазмы можно делать по-разному. Если быстро увеличить тороидальное магнитное поле, плазма сожмется по малому радиусу — получится тонкий плазменный шнур в виде кольца (рис. 6.4, а).

А можно сжимать плазму по большому радиусу. Для этого нужно быстро увеличивать не продольное, а поперечное (вертикальное) поле. В этом случае плазма стягивается в кольцо меньшего радиуса (рис. 6.4, б).

Эксперименты по адиабатическому сжатию плазмы по малому радиусу проводились на советском токамаке «Туман-2» в Ленинграде и на английском токамаке «Тоска». На американском токамаке «АТС» в Принстоне изучал-

ся нагрев плазмы при адиабатическом сжатии плазмы по большому радиусу.

В экспериментах на советском и английском токамаках при сжатии плазмы по малому радиусу наблюдалось повышение температуры даже более сильное, чем ожидалось по расчетам. Это, по-видимому, объясняется тем, что при сжатии плазмы уменьшается ее взаимодействие со стенками вакуумной камеры и диафрагмой. В итоге снижается количество поступающих в плазму примесей и уменьшаются потери энергии на излучение. Вот температура и возрастала, и не только в результате сжатия, но и из-за уменьшения потерь.

В опытах на токамаке «АТС» температура плазмы в результате сжатия тоже возросла, но меньше, чем ожидали. В этих опытах при уменьшении большого радиуса плазмы происходит перемещение шнура плазмы внутри вакуумной камеры. Во время этого движения плазма успевает выбить из стенок камеры и диафрагмы довольно много атомов примесей. Их излучение уносит часть энергии, и поэтому температура плазмы в конце сжатия получается ниже, чем должна была быть по расчетам.

Несмотря на успех, достигнутый в этих опытах, особенно в советских и английских экспериментах, этот метод нагрева плазмы не получил широкого распространения, потому что сжатие плазмы требует очень большой затраты энергии на увеличение магнитного поля.

Пучки быстрых атомов

При обсуждении трудностей термоядерной проблемы в гл. I мы уже обратили внимание на один парадокс — энергия заряженных частиц в плазме при температуре 100 миллионов градусов, которую так трудно достичь, нагревая плазму, составляет всего лишь 10 кэВ. Это значит, что заряженная частица, несущая заряд, равный заряду электрона, наберет такую энергию, пройдя между электродами, к которым приложено напряжение в 10 кВ.

Напряжение в 10 кВ? Это же очень просто. Такие напряжения широко применяются в лабораторной практике. Да что там десять, сто киловольт вполне освоены. А ведь это соответствует температуре в миллиард градусов. Так что таким способом — ускорением в электрическом поле — можно получать даже более горячие частицы, чем нужно для термоядерного синтеза.

Только вот как их употребить? Ведь заряженной частице попасть в хорошую ловушку так же трудно, как и выйти из нее.

Выход из этого затруднения нашли в том, чтобы инжектировать в ловушку нейтральные атомы водорода H . Нейтральные атомы водорода свободно проникают через магнитное поле ловушки, а попадая в плазму, ионизируются и превращаются в ион H^+ , который уже удерживается магнитным полем ловушки.

Так как атом H проходит через магнитное поле при любой энергии, нет необходимости делать ее слишком большой. Достаточно, скажем, 20 или 30 кэВ, что в 2—3 раза больше, чем энергия, соответствующая термоядерной температуре 100 миллионов градусов, чтобы иметь запас на компенсацию неизбежных потерь в энергии.

Но теперь возникла новая проблема: а как ускорять нейтральные атомы до этих самых 20—30 кэВ? Ведь электрическое поле, как и магнитное, на них не действует.

Пусть работает перезарядка

Можно ускорять заряженные ионы H^+ , что сделать легко и просто, а потом дать им возможность с помощью перезарядки превратиться в нейтральные атомы H и использовать эти энергичные атомы для инъекции в ловушку.

Эта идея начала осуществляться в начале 60-х годов. Сначала использовали источники ионов H^+ , разработанные для электромагнитного разделения изотопов. В этих устройствах природная смесь изотопов ионизовалась с помощью электронного пучка. Образующиеся ионы ускорялись и разделялись в магнитном поле.

Так вот, в первых инжекторах пучков атомов водорода использовали готовые разработки ионных источников H^+ . Но эти источники для термоядерных целей оказались слабыми. Они давали ток в десятые доли ампера. При напряжении в 20—30 кВ общая мощность, которую несут частицы пучка, получалась всего лишь несколько киловатт, что для сколько-нибудь заметного нагрева плазмы в токамаке конечно очень мало.

Перелом наступил в начале 70-х годов, когда были созданы плазменные источники ионов большой площади. Плазма, довольно холодная по термоядерным меркам — с температурой 20—30 тысяч градусов, создавалась с помощью разряда в газе. Чтобы уменьшить потери частиц

этой плазмы, боковые стенки разрядной камеры обкладываются постоянными магнитами. Образуется магнитная ловушка с довольно слабым магнитным полем, но для такой холодной плазмы и этого достаточно.

Вблизи торцевой поверхности камеры помещаются электроды с множеством отверстий. На эти электроды подается ускоряющее напряжение, значение которого несколько десятков киловольт. Под действием электрического поля ионы вытягиваются из плазмы, ускоряются, проходя между этими электродами, и вылетают в перезарядочную камеру.

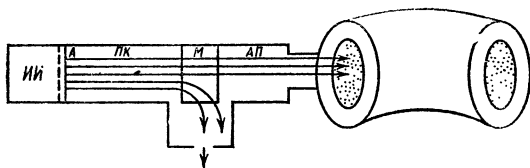


Рис. 6.5. Схема инжектора пучка нейтральных атомов: ИИ — источник ионов; А — анод; ПК — перезарядочная камера; М — магнит; АП — атомопровод.

Перезарядочная камера — это просто труба длиной около 1 м, заполненная водородом. В ней ускоренные ионы в результате перезарядки превращаются в нейтральные атомы. Часть ионов не успевает перезарядиться. Чтобы очистить от них пучок, на выходе из перезарядочной камеры стоит электромагнит, который отклоняет неперезарядившиеся ионы в сторону. Там установлены охлаждаемые водой приемники (рис. 6.5).

Чтобы газ из перезарядочной камеры не попадал в токамак, сформированный пучок атомов пропускают через еще одну трубу, носящую романтическое название — атомопровод. Внутренние стенки атомопровода покрывают распыленным титаном, а в нескольких установках еще и охлаждают жидким азотом, а то и гелием. Распыленный титан жадно поглощает водород. Поэтому стенка, покрытая распыленным титаном, работает как прекрасный насос. Скорость откачки водорода достигает сотни тысяч литров в секунду.

Очищенный таким образом от ионов и от газа пучок направляется затем в термоядерную установку для нагрева плазмы.

Построенные по такой схеме инжекторы позволяют получать в пучке диаметром 20 см поток атомов, ускоренных до энергии в 40 кэВ, с эквивалентным током 25 А. Мощность, которую несет такой пучок, доходит до миллиона ватт.

Но не только в мощности дело

Первые попытки использовать пучки атомов для нагрева плазмы в токамаках были сделаны в начале 70-х годов на английском токамаке «Клео». В этих опытах мощность пучка атомов была 140 кВт. Из

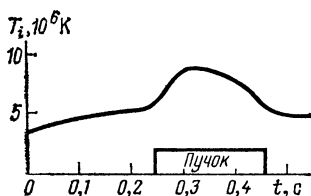


Рис. 6.6. Нагрев плазмы пучком нейтральных атомов.

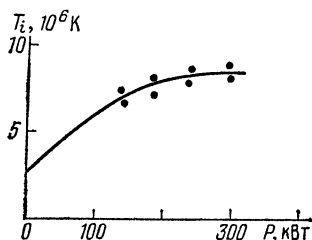


Рис. 6.7. Температура, до которой нагреваются ионы в плазме, в зависимости от мощности пучка.

них примерно 30%, т. е. около 50 кВт, поглощались плазмой. Эта мощность была значительно меньше мощности, которая выделялась в плазме электрическим током. Поэтому увеличение ионной температуры благодаря добавочной мощности нагрева если и было, то настолько мало, что его не удалось отчетливо зарегистрировать. Единственным свидетельством того, что атомы из пучка ионизовались плазмой и захватывались магнитным полем ловушки, было появление быстрых частиц в спектре атомов, вылетающих из ловушки в результате перезарядки.

В середине 70-х годов опыты с нагревом плазмы нейтральными пучками начались на многих токамаках: на американских «Ормак» и «АТС», советском «Т-11», французском «ТФР», английском «Дайте».

В этих экспериментах мощность инжектируемого пучка атомов была, как правило, на уровне нескольких сот киловатт. Однако плазма не очень-то хотела нагреваться. В начале инжекции температура плазмы росла,

а потом начинался бурный рост излучения примесей и температура плазмы переставала расти, а то даже начала снижаться несмотря на то, что нагрев продолжался (рис. 6.6).

Не приводило к успеху и повышение мощности инжектируемого пучка. Рост температуры плазмы с увеличением мощности сначала замедлялся, а потом и совсем прекращался (рис. 6.7).

Причина всего этого была все та же — излучение примесей.

Чем больше энергии вкладывается в плазму, тем больше ее попадает на стенку, тем больше поступает в плазму примесей, тем больше они уносят энергии. И результат в этой своеобразной гонке, как правило, оказывался в пользу примесей.

УВЧ-терапия плазмы

Одновременно с развитием метода нагрева плазмы пучками нейтральных атомов развивался еще один весьма перспективный метод — нагрев плазмы токами высокой частоты. Этот метод нагрева читатель, возможно, испытывал на себе — в физиотерапевтическом кабинете поликлиники, где токи высокой частоты используются для местного прогрева участков тела с лечебной целью.

В этом методе прогреваемый участок тела располагается вблизи катушки, по которой текут токи высокой частоты. С точки зрения физики происходит вот что. Катушка служит антенной, испускающей радиоволны. Эти радиоволны поглощаются в теле больного, и их энергия выделяется в виде тепла.

Так как плазма состоит из заряженных частиц, она взаимодействует с радиоволнами. Плазма может отражать, преломлять, поглощать радиоволны. Эти свойства плазмы можно использовать для нагрева плазмы с помощью радиоволн.

Здесь возникает несколько проблем. Прежде всего, плазма поглощает далеко не всякие радиоволны. Имеется всего лишь несколько выделенных частот, вблизи которых наблюдается заметное поглощение. Эти выделенные частоты связаны с вращением в магнитном поле заряженных частиц, из которых состоит плазма, — электронов и ионов.

Электромагнитные волны, в том числе и радиоволны, состоят, как известно, из колеблющихся электрического и магнитного полей. Когда электрон или ион попадает в

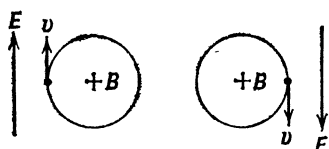


Рис. 6.8. Циклотронный резонанс при нагреве плазмы радиоволнами

он ускоряется в этом поле и начинает набирать энергию. Но через полпериода колебаний электрическое поле меняет свое направление на противоположное и электрон начинает, наоборот, тормозиться. Так что свободная заряженная частица под действием радиоволны только колеблется, а поглощения энергии не происходит.

Однако если частица находится, кроме того, еще и в постоянном магнитном поле, то поглощение энергии радиоволн может происходить.

Если частота радиоволны как раз равна частоте вращения частицы в магнитном поле, то ситуация меняется. Пусть частица в магнитном поле вращается по окружности и в данный момент движется вверх (см. рис. 6.8). Если и поле радиоволны тоже направлено вверх, то положительно заряженная частица начнет ускоряться и будет набирать энергию. Через полпериода вращения частицы в магнитном поле она опишет половину окружности и будет двигаться вниз.

Если частота радиоволны совпадает с частотой вращения частицы, то электрическое поле волны в этот момент будет направлено тоже вниз и частица будет продолжать ускоряться. То же самое произойдет еще через полпериода, когда частица опишет вторую половину окружности, а направление поля в радиоволне снова изменится на противоположное.

Такой механизм ускорения частиц в магнитном поле был открыт еще в 30-х годах и использовался для ускорения частиц для нужд ядерной физики до небольших с сегодняшней точки зрения энергий, в несколько миллионов электронвольт. Такой ускоритель назывался циклотроном. Точно так же называют и сам метод ускорения частиц — циклотронное ускорение. Метод циклотронного ускорения основан на совпадении частот — резонансе радиоволны и вращения частиц в магнитном поле.

Частота вращения частиц в магнитном поле зависит от массы частицы. Поэтому для электронов и ионов она

существенно разная. Для ионов водорода в магнитном поле в несколько тесла, обычно применяемом в магнитных ловушках, частота вращения лежит в диапазоне нескольких десятков мегагерц. Эта частота соответствует диапазону «коротких волн» — радиоволнам с длиной волны около 10 м. В связи с потребностями радиосвязи техника генерации радиоволн этого диапазона развита очень хорошо. Поэтому создание генератора для ионного циклотронного нагрева мощностью даже и в миллионы ватт не представляет сложной проблемы.

Совсем другая ситуация с электронами.

Циклотронная частота для электронов составляет уже десятки тысяч мегагерц, что соответствует волнам миллиметрового диапазона. Эта область радиотехники находится еще только в стадии освоения. Хотя изобретено несколько типов генераторов, которые могут работать в диапазоне миллиметровых волн, все они недостаточно мощные.

Решительное изменение в эту ситуацию внесли работы советских ученых.

В Горьковском институте прикладной физики Академии наук СССР были разработаны генераторы нового типа — гиротроны, способные развивать в миллиметровом диапазоне длин волн мощности в сотни киловатт.

С помощью этих генераторов уже выполнены первые эксперименты по электронному циклотронному нагреву плазмы в токамаках «ТМ-4» и «Т-10». С будущим токамаке «Т-15» предполагается использовать для электронного циклотронного нагрева плазмы 24 гиротрона общей мощностью 5 МВт.

Еще одна область частот, где имеется поглощение радиоволн плазмой, лежит около сотен мегагерц. В поглощении энергии радиоволн плазмой в этой области частот участвуют одновременно и циклотронное вращение электронов, и колебания плазмы. Поэтому эти частоты называют гибридными. Гибридные частоты соответствуют радиоволнам метрового диапазона, которые широко применяются в телевидении, и в связи с этим проблемы с генераторами здесь тоже нет.

Большая мощность — это еще не все!

Первые опыты по нагреву плазмы в токамаках радиоволнами начались в начале 70-х годов. Результаты этих опытов были малоутешительны. Хотя поглощение радиоволн было вполне приличным, нагрев

плазмы был весьма слабым, а то и совсем отсутствовал. Более детальные исследования показали, что поглощение происходит на периферии плазмы, где плотность плазмы довольно мала. При включении радиочастотной мощности здесь появлялись быстрые частицы, ускоренные в поле радиоволны. Эти быстрые частицы, однако, не успевали передать свою энергию остальной плазме. Большая скорость этих частиц приводила к большой скорости дрейфа в неоднородном магнитном поле ловушки. В результате такие частицы очень быстро попадали на стенку, унося туда свою энергию, и, что самое неприятное, порождали усиленный поток примесей. Попадая в плазму, эти примеси начинали излучать с такой мощностью, что основная масса плазмы после включения радиочастотного генератора не только не нагревалась, а даже охлаждалась.

Чтобы этого не происходило, пришлось довольно много потрудиться над конструкцией антенн. Для каждого диапазона частот в конце концов были разработаны антенны, обеспечивающие проникновение высокочастотной мощности в глубину плазмы. В этом случае быстрые частицы, набравшие большую энергию за счет электромагнитной волны, удерживаются значительно лучше. Большая часть их энергии успевает передаться другим частицам плазмы и повысить их температуру. Применение усовершенствованных антенн дало свои плоды — плазма начала нагреваться.

В экспериментах по нагреву на гибридных частотах на токамаках «ФТ-1» (СССР), «АТС» (США), «Петула» (Франция), «Дж ФТ-2» (Япония) наблюдался прирост температуры плазмы на 1—1,5 миллиона градусов при мощности ВЧ-генераторов от 100 до 600 кВт. То есть прирост температуры составлял несколько градусов на ватт. Отсюда нетрудно подсчитать, что для достижения термоядерной температуры в 100 миллионов градусов понадобится мощность в несколько десятков мегаватт. В этих опытах плазма поглощала 75—90% подводимой мощности, а на нагрев плазмы уходило только 15%, остальное уносилось прочь с излучением примесей.

Примерно такие же результаты получились при нагреве плазмы на частотах, соответствующих ионному циклотронному резонансу. Эти опыты проводились на советских токамаках «ТМ-1», «ТО-1», «Т-4» и американских «ST» и «АТС».

Сначала пробовали греть ионы точно на расчетной циклотронной частоте ионов дейтерия — нагрев получился

очень слабым. Потом стали пробовать другие частоты. На частоте, вдвое превышающей расчетную частоту для ионов дейтерия, получили неожиданно сильный нагрев — температура ионов возросла на 2 миллиона градусов при мощности генератора всего лишь в 150 кВт.

Чтобы найти разгадку этого неожиданного успеха, потребовалось провести довольно длительные и детальные исследования. Оказалось, во всем «виноваты» опять примеси! Примесью в данном случае оказался водород, который содержался в плазме в количестве 2—3% наряду с дейтерием.

Ионы водорода примерно вдвое легче ионов дейтерия. Поэтому вдвое более высокая, чем циклотронная частота дейтерия, частота генератора для ионов водорода оказалась как раз резонансной. Протоны эффективно разгонялись в поле волны, а уже от них нагревались ионы дейтерия и электроны.

Такой способ нагрева оказался довольно удачным. В этом случае, как показали подробные измерения на советском токамаке «Т-4», разгоняются до большой энергии только ионы водорода, а ионы дейтерия, составляющие основную массу плазмы, до большой энергии не разгоняются, и поэтому их удержание остается хорошим.

Ожидается, что такой способ нагрева на более крупных установках будет еще эффективнее. Результаты первых экспериментов на токамаках «ТФР» (Франция) и «ПЛТ» (США), кажется, подтверждают эти предположения. Прирост ионной температуры составляет примерно 20 градусов на ватт, и, значит, термоядерной температуры можно достичь с помощью генератора мощностью всего лишь в 5 МВт. Но еще неизвестно, как поведут себя примеси при таком уровне подводимой к плазме мощности. Ведь даже в современных опытах при уровне мощности, в десятки раз меньшем, примеси уносят больше половины подводимой к плазме мощности. Да, все упирается в проблему примесей.

Дивертор

Так как примеси поступают в плазму снаружи, они прежде всего попадают в самый внешний слой плазмы. Можно попытаться бороться с поступлением примесей, если непрерывно убирать их из этого внешнего слоя. Именно эта идея лежала в основе устройства, предложенного Л. Спитцером в 1951 г. и названного им дивертором. Мы уже описывали устройство дивертора в

гл. IV, когда рассказывали о стеллараторах. В дальнейшем диверторы стали применяться и в экспериментах на токамаках. В ходе этих экспериментов было разработано несколько вариантов конструкции дивертора, отличающихся геометрией магнитного поля, хотя принцип действия остался без изменения.

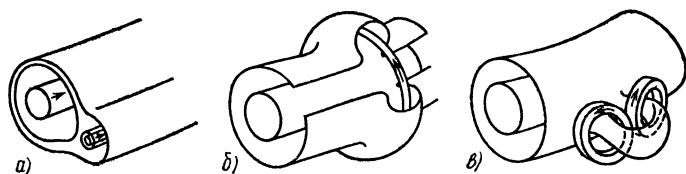


Рис. 6.9. Различные типы диверторов: а) полоидальный; б) тороидальный; в) бандл-дивертор.

С помощью специальной магнитной обмотки внешний слой плазмы толщиной в несколько сантиметров (диверторный слой) отщепляется от плазменного шнура и направляется в дополнительный объем, где плазма вместе с примесями превращается в газ и откачивается насосами.

Дивертор Спитцера называется тороидальным дивертором (рис. 6.9, б). Это, конечно, не единственный способ создания дивертора. Образование диверторного слоя можно добиться и по-другому, пустив ток по проводу, проложенному вдоль внешней поверхности тора. Теперь петля из силовых линий магнитного поля образуется в поперечном (полоидальном) направлении (рис. 6.9, а). Поэтому такой дивертор принято называть полоидальным.

В обоих этих вариантах диверторный слой снимается со всей поверхности плазмы. Но можно, воспользовавшись вращением силовых линий магнитного поля, сэкономить место и устроить небольшой локальный дивертор, отщепив в него слой силовых линий лишь на небольшом участке (рис. 6.9, в). За счет вращения силовых линий частицы плазмы, обходя снова и снова вокруг тора, в конце концов попадут на те силовые линии, которые проходят сквозь дивертор. Именно такой локальный дивертор использовали на английском токамаке «Дайте». Его назвали бандл-дивертор.

Эксперименты с полоидальным дивертором проводились на токамаках «Дива» в Японии и «Т-12» в СССР. Результаты этих экспериментов показали, что использование как полоидального, так и бандл-дивертора дает примерно одинаковый эффект — поток примесей в плазму снижается примерно в 2 раза.

ГЛАВА VII

60 МИЛЛИОНОВ ГРАДУСОВ В ТОКАМАКЕ

К концу 70-х годов эксперименты на токамаках показали, что возможности нагрева током, текущим по плазме, практически исчерпаны. С помощью тщательной очистки стенок от примесей, использования диверторов, кропотливого подбора условий разряда, удалось довести температуру электронов до 15–20, а температуру ионов до 10 миллионов градусов.

Чтобы двигаться дальше, нужно использовать дополнительные методы нагрева. Эксперименты с различными вариантами дополнительного нагрева на уровне мощности в сотни киловатт, описанные в предыдущей главе, выявили два наиболее перспективных направления — это нагрев плазмы с помощью высокочастотных полей на частотах ионного и электронного циклотронного резонансов и нагрев с помощью пучков быстрых нейтральных атомов. Результаты предварительных опытов показали, что достижение термоядерной температуры с помощью этих методов возможно при уровне мощности в миллионы ватт.

Установки такой мощности очень сложны. Их разработка и сооружение связаны с решением целого ряда инженерных проблем и требуют значительного времени. В СССР к концу 70-х годов были достигнуты значительные успехи в разработке высокочастотных генераторов сантиметрового диапазона — гиротронов.

В развитии техники получения пучков нейтральных атомов мегаваттной мощности наибольших успехов добились американские ученые в Окридже. В начале 1978 г. там были разработаны инжекторы с мощностью пучка до 0,9 МВт. Четыре таких инжектора были подготовлены для проведения экспериментов на крупнейшем американском токамаке «ПЛТ».

Токамак «ПЛТ» находится в Принстонском университете, поэтому он так и называется — по первым буквам «Princeton Large Torus» (принстонский большой тор). Эксперимент по нагреву плазмы на «ПЛТ» проходил так. Сначала, как обычно, зажигают плазменный разряд и плазму нагревают током, текущим в ней. При этом температура ионов поднимается до 10 миллионов градусов. Чтобы нагреть плазму еще сильнее, в нее направляют поток быстрых атомов водорода.

Летом 1978 г. автор вместе с сотрудником Института атомной энергии им. И. В. Курчатова В. А. Вершковым

находился в Принстоне. В рамках советско-американского соглашения о сотрудничестве ставился совместный эксперимент по диффузии примесей в плазме токамака. Так получилось, что мы стали очевидцами эксперимента по нагреву плазмы в токамаке «ПЛТ».

Трудности и неприятности

На первых порах эксперимент в Принстоне не ладился. Четыре генератора атомных пучков редко срабатывали синхронно. И поэтому мощность пучков в каждом импульсе или, как говорят специалисты, выстреле менялась самым неожиданным образом. А когда генераторы срабатывали одновременно, то плазма все равно не нагревалась. Быстрые частицы, обрушиваясь на стенки камеры, выбивали из них атомы примесей: железа, вольфрама, а также кислорода и углерода, по-видимому, адсорбированных на поверхности стенок. Попадая в плазму, вещества эти начинают ярко светиться. Тем самым уносятся энергия и охлаждается плазма. Особенно большие неприятности доставлял вольфрам. Его ионы, несмотря на сильное магнитное поле, каким-то таинственным образом за сотые доли секунды достигали центра плазменного сгустка и начинали излучать энергию. Мощность излучения вольфрама была столь велика, что часто превышала суммарную мощность поступающего в плазму тепла от тока и атомных пучков. Физики невесело шутили, что можно брать патент на способ охлаждения плазмы — вдруг когда-нибудь да понадобится быстро охладить реактор...

Промучившись около двух недель и выяснив, что все неприятности, в основном, связаны с вольфрамом, экспериментаторы решили вскрыть установку и выкинуть все вольфрамовые части. Их заменили на такие же детали из нержавеющей стали.

Когда возобновили эксперименты, то увидели, что доминирующей стала примесь железа, но полная мощность излучения всей плазмы стала меньше, чем вкладываемая с помощью пучков. В результате плазма даже немного нагревалась. После некоторых выстрелов температура ионов возрастала с 10 до 15 или даже до 20 миллионов градусов.

Успех, естественно, надо было закрепить, попытавшись заменить материал, из которого изготовлены детали, контактирующие с плазмой. Чем меньше электронов в атоме,

тем лучше. Поэтому обратились к началу таблицы Менделеева: железо заменили углеродом, точнее графитом, так как алмазов размером в десятки сантиметров не бывает.

С большим нетерпением все ожидали возобновления экспериментов. Какая же температура получится теперь?

Углеродная конструкция оказалась гораздо лучше железной. Мощность излучения плазмы резко снизилась, и температура пошла вверх.

Вот это да!

Температура не только пошла вверх, а прямо-таки подскочила. В отдельных выстрелах, когда все четыре пучка удачно срабатывали, температура плазмы даже уходила в бесконечность. Во всяком случае так это выглядело на экране дисплея. Здесь (рис. 7.1) вы видите одну из картинок, которые рисует компьютер сразу после выстрела. На ней показана температура ионов, вычисленная по скорости рождения нейтронов, т. е. прямо по скорости самой термоядерной реакции. Как уже говорилось выше, без дополнительного нагрева эта температура подходит к 10 миллионам градусов. Ожидали, что при включении пучков она несколько возрастет. Программа, заложенная в вычислительную машину, предусматривала рамку для этой картинки со шкалой до 20 миллионов градусов. Но при включении пучков кривая температуры устремилась вверх, пересекая рамку и уходя за край экрана.

Увидев все это, один из физиков воскликнул: «С плазмой творится что-то странное!» Последовала короткая дискуссия, и все сошлись на том, что, наоборот, плазма в кои-то веки повела себя нормально. Ее температура возрастала в соответствии с простейшим законом — пропорционально вкладываемой мощности.

В ходе изнурительной возни с коварной плазмой физики как-то отвыкли от мысли, что в природе соблюдаются и такие простые законы. Ведь больше 25 лет ушло только на то, чтобы получить температуру 10 миллионов градусов. Но вот вдруг оказалось, что за пределами 10 миллионов градусов природа приготовила нам подарок: плазму можно нагревать так же просто, как воду в чайнике!

Хотя недостатка в мрачных предсказаниях теоретиков о неустойчивостях, которые должны развиваться

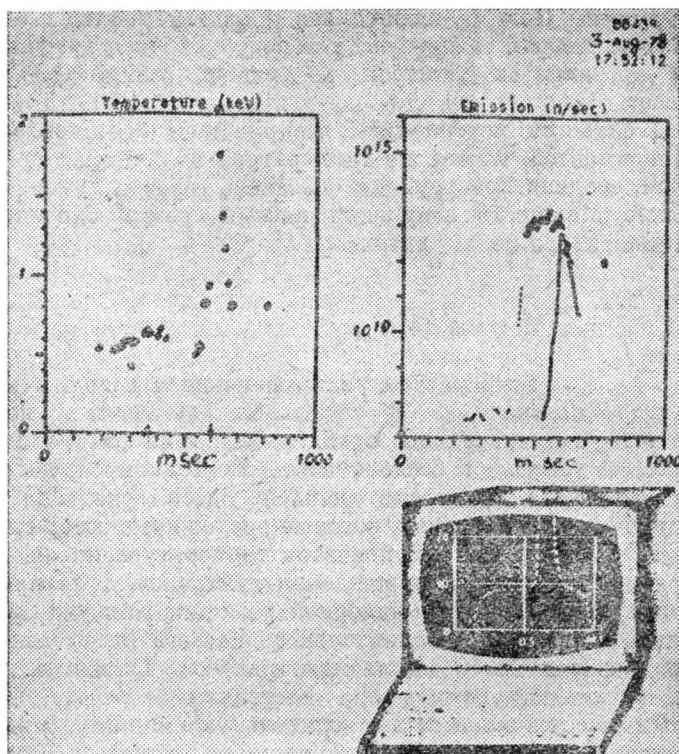


Рис. 7.1. Эта картинка взята из компьютера 3 августа 1978 г. в 17 ч 52 мин 12 с — после того самого выстрела, когда температура ионов неожиданно пошла вверх. Цифры 1 и 2 соответствуют температуре 10 и 20 миллионов градусов, внизу отложено время, цифра 1000 соответствует одной секунде. На том же экране фиксировалось рождение нейтронов в термоядерной реакции. В этом выстреле скорость рождения нейтронов подскочила до 10^{13} частиц в секунду. На экране дисплея все это выглядело вот так. Какая была температура на самом деле во время выстрела № 68439, так и осталось неизвестным — точка ушла за край экрана.

в плазме токамака при температуре в десятки миллионов градусов, не было, это был тот редкий случай, когда поведение плазмы оказалось лучше, чем от нее ожидали.

Ночной рекорд

Температура плазмы стремительно росла. По мере повышения мощности стали появляться числа 50, 60, 70 миллионов градусов. Всеобщее возбуж-

дение достигло предела. Физики работали с восьми утра и до двенадцати, до часу ночи.

Однако сквозь радость сквозила и тревога: а вдруг все эти числа — ошибка? Ведь измерительные приборы никогда в этой области температуры не работали. Необходимо все много раз проверить, заново отградуировать, поставить множество контрольных опытов, прежде чем можно будет сказать: да, температура воистину такова.

А между тем температура действительно приближалась к термоядерной. Скорость рождения нейтронов достигла $7 \cdot 10^{13}$ частиц в секунду. Дозиметристы, дежурившие вместе с физиками в контрольной комнате «ПЛТ», объявили, что дальше работать нельзя, не усилив защиту от нейтронов, — доза излучения достигла предельно допустимых норм.

Даже теоретики, работавшие в соседних с «ПЛТ» комнатах, с серьезным видом объявили, что у них наблюдаются нейтронные дефекты в формулах.

Между тем продолжалось обсуждение результатов эксперимента. При этом из осторожности принимались всевозможные поправки, снижающие оценку полученной температуры. И наоборот, поправки, требующие повысить оценку, принимались с большим сомнением. Дискуссия продолжалась бы, по-видимому, до конца августа, — до открытия Международной конференции по физике плазмы и УТС в Инсбруке (Австрия), где предстояло сделать доклад об экспериментах на «ПЛТ». Но в середине августа разыгралась почти детективная история.

В день, а вернее в ночь на 10 августа 1978 г., когда была получена самая большая температура плазмы, приборы показали 85 миллионов градусов, один из физиков, итальянец, не выдержал, позвонил в Италию и сообщил об этом потрясающем результате коллегам, работавшим над той же проблемой в лаборатории физики плазмы во Фраскатти под Римом.

На следующий день рано утром в лабораторию позвонили из Вашингтона и со ссылкой на сообщение из Италии потребовали разъяснить, что там такое открыли в Принстоне. Так как результат был получен поздно ночью, то начальник «ПЛТ» В. Стодрик еще ничего не знал. Разъяренный, он прибежал в лабораторию и устроил разнос за разглашение сырых результатов, которые еще надо проверять и проверять.

В тот же день по лаборатории был издан приказ, запрещающий разглашать неопубликованные данные, и всех

иностранных ученых заставили дать подписку о молчании. Но было уже поздно. Слухи просочились в печать, и репортеры осадили Принстон. Через три дня лаборатория сдалась. Корреспонденты газет, радио и телевидения были допущены на «ПЛТ», и сенсация облетела все газеты мира. Из осторожности было объявлено, что получена температура 60 миллионов градусов, хотя в нескольких выстрелах приборы показывали 85 миллионов градусов. На 15 миллионов градусов температуру занизили в силу обоснованных поправок и еще на 10 миллионов — просто так, на всякий случай. Ведь 85 миллионов градусов получили всего лишь в нескольких выстрелах, а 60 миллионов — во многих десятках.

В этот же день состоялось торжество, на котором были съедены пять огромных тортов вместе с надписью на них «Температура ионов 60 миллионов градусов».

А что же дальше?

Результаты, полученные на «ПЛТ», прежде всего вселили уверенность в том, что проблема управляемого термоядерного синтеза все же будет решена. Эта уверенность основывается на двух важнейших выводах из экспериментов. Во-первых, плазма уже нагрета почти до 100 миллионов градусов. Во-вторых, вопреки предсказаниям теоретиков, с плазмой при приближении к термоядерной температуре ничего особенного не произошло.

Эти выводы, действительно, очень важны, но нельзя, конечно считать (как заявили некоторые газеты), что проблема УТС уже практически решена. Ведь нагрев плазмы до достаточно высокой температуры — это только одно из трех необходимых условий. Нужно еще получить ту же температуру в плазме, имеющей плотность $2 \cdot 10^{20} \text{ м}^{-3}$, и удерживать эту плазму в течение не менее одной секунды. По двум последним параметрам результаты «ПЛТ» довольно скромные: плотность плазмы при рекордной температуре была в 10 раз ниже необходимой, а время удержания в 40 раз меньше секунды. Так что работы предстоит еще много (рис. 7.2).

Наступление широким фронтом

Исследования на токамаках занимают сейчас центральное место в работах по программе УТС во всех странах.

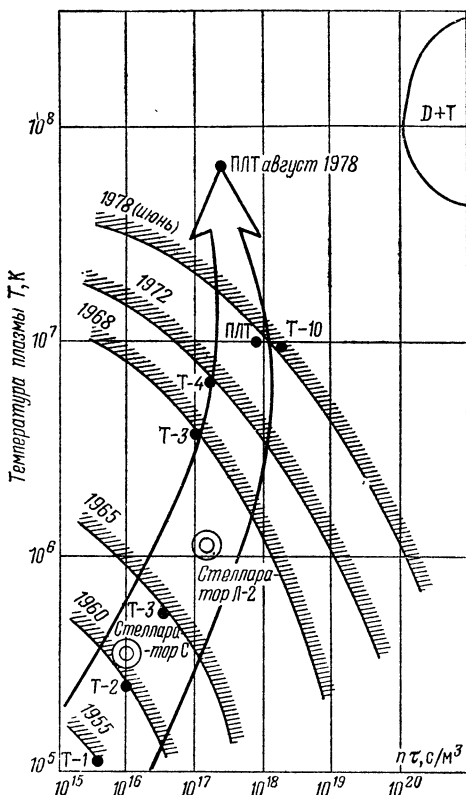


Рис. 7.2. Так выглядит прорыв «ПЛТ» на карте поля боя.

Очень широким фронтом ведутся они в СССР. На пути к термоядерной электростанции стоит еще множество проблем, так что работы всем хватает.

На крупнейшем в настоящее время советском токамаке «Т-10» (рис. 7.3) исследуются закономерности удержания плазмы в различных режимах работы. Чтобы уверенно предсказывать поведение плазмы в термоядерном реакторе, нужно выяснить, как изменяются характеристики ее удержания в зависимости от плотности, температуры, магнитного поля. Особенно важно это выяснить относительно теплопроводности и времени удержания частиц самой плазмы.

Эксперименты, выполненные в последние годы, показывают, что удержание и частиц, и энергии плазмы в то-

камаках улучшается с увеличением плотности плазмы. Поэтому в будущем реакторе выгодно иметь как можно более плотную плазму. Но при повышении плотности растет и давление плазмы.

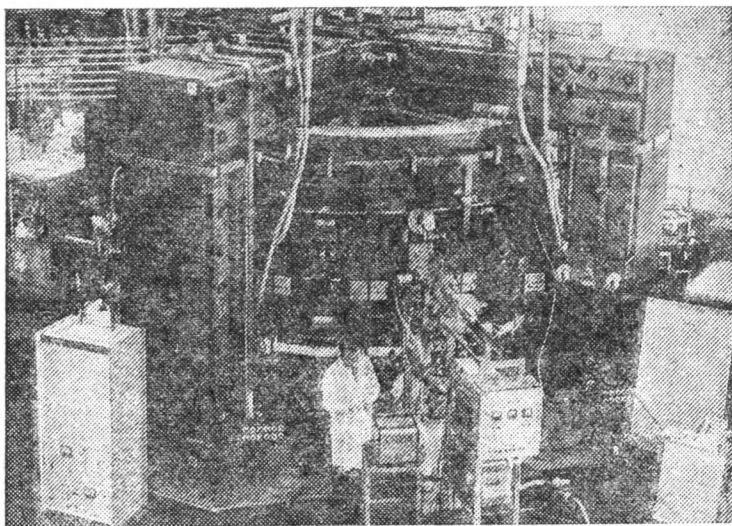


Рис. 7.3. Токамак «Т-10»

Можно, конечно, одновременно повышать индукцию магнитного поля, но это требует большого расхода энергии. Поэтому желательно добиться максимально большого отношения давления плазмы к давлению магнитного поля β . Величина β имеет большое значение для экономики термоядерного реактора. Предварительные экономические расчеты показывают, что создание конкурентоспособного реактора возможно, только если β будет не меньше, чем 5 или 10%.

Обычно в современных токамаках значение β бывает около 1%. Увеличение давления плазмы задача не простая. Теоретики предсказывают множество опасных неустойчивостей, которые могут развиваться в плазме при повышении ее давления. К счастью, на опыте эти мрачные предсказания оправдываются не всегда. На токамаке «Т-11», например, путем дополнительного подогрева плазмы пучками нейтральных атомов удалось довести давление плазмы до 2,5% давления магнитного поля. При-

плось теоретикам искать причины неожиданной устойчивости плазмы в таких условиях.

На токамаке «Т-10» отработывается методика нагрева плазмы радиоволнами. Работа ведется на длине волны 3,6 мм, когда частота волны совпадает с частотой вращения электронов в магнитном поле. В этих условиях электроны хорошо поглощают энергию радиоволн, а затем передают ее ионам. Недавно в этих экспериментах температуру электронов удалось довести до 30 миллионов градусов при плотности плазмы $(4 \div 5) \cdot 10^{19} \cdot \text{м}^{-3}$. Причем мощность генератора в этих экспериментах была всего лишь 0,5 МВт. Так что эффективность нагрева в этом опыте была выше, чем при нагреве плазмы на «ПЛТ» нейтральными пучками.

На токамаке «Т-7» советскими и чехословацкими учеными поставлен совместный опыт по возбуждению в плазме токамака тока с помощью высокочастотных волн. Этот эффект может иметь важное значение для успеха всей программы токамаков. При традиционном индуктивном способе возбуждения тока в токамаке длительность импульса тока всегда ограничена, так как индуктивное напряжение возникает только при постоянном повышении магнитного потока внутри плазменного витка. В конце концов повышение потока приходится прекратить из-за магнитного насыщения железа в трансформаторе или же из-за ограниченной тепловой или механической прочности обмоток. Поэтому проекты реакторов на основе токамака предусматривают работу импульсами длительностью по несколько сот или тысяч секунд. В интервалах между импульсами ток в плазме прерывается и плазма погибает. Кроме необходимости каждый раз заново создавать и нагревать плазму, такой импульсный режим создает еще и множество инженерных проблем, связанных с влиянием импульсной тепловой и механической нагрузки на прочность и долговечность деталей конструкции. Поэтому возможность создания стационарно работающего реактора-токамака сразу же избавила бы его от одного из основных недостатков.

В экспериментах на «Т-7», кроме заметного повышения температуры плазмы, обнаружено снижение напряжения на обходе установки, которое гонит по плазме ток. Сначала думали, что понижение напряжения связано с уменьшением электрического сопротивления плазмы — ведь температура электронов повышается, а сопротивление плазмы падает с ростом электронной температуры

как $T^{-1/2}$. Тщательные измерения и расчеты показали, однако, что этого недостаточно. Оказалось, что падение напряжения происходит еще и потому, что в плазме возникает дополнительный ток в результате прямого воздействия высокочастотной волны на электроны плазмы.

Мощность генератора, который использовался в этих экспериментах, была около 200 кВт. Во время импульса генератора радиоволн напряжение на обходе плазмы падало до нуля и ток поддерживался одним только ВЧ-полем. Сила тока в этом эксперименте была свыше 200 кА. Из этого следует, что для поддержания тока в несколько миллионов ампер, необходимого для удержания плазмы в реакторе-токамаке, можно использовать генераторы радиоволн и, таким образом, создание стационарно работающего реактора-токамака становится вполне реальным.

В Ленинградском физико-техническом институте на токамаках «Туман-2» и «Туман-3» исследуется нагрев плазмы при ее сжатии. В этих установках плазма создается в относительно слабом магнитном поле. Затем поле резко увеличивают. Давление магнитного поля сжимает плазму. В результате плазма сильно нагревается.

В опытах на токамаках «Туман-2» и «Туман-3» обнаружен еще один очень полезный эффект — в процессе сжатия плазмы она далеко отрывается от стенки вакуумной камеры. В результате сокращается поступление примесей в плазму и уменьшаются потери тепла.

Чтобы в полной мере реализовать достоинства этого метода, разработан проект токамака «Т-14», в котором для сжатия плазмы магнитное поле в катушках будет быстро возрастать. При этом по расчетам температура и плотность плазмы должны подняться до термоядерных значений.

Схема этой установки показана на рис. 7.4. Огромный тор диаметром по оси около 11 м из катушек диаметром 4 м служит накопителем энергии; $15 \cdot 10^7$ Дж накапливаются в нем в виде энергии магнитного поля. Затем вся энергия эта сбрасывается на массивные и весьма прочные катушки токамака (наверху), при этом электрическая мощность достигает 10^7 кВт. Больше, чем в будущем термоядерном реакторе! При такой мощности питания магнитное поле в плазме достигает 13 Тл, и плазма нагревается до температуры зажигания термоядерной реакции.

Для предварительного нагрева плазмы используются инъекция нейтральных атомов и нагрев радиоволнами.

Для предварительной отработки этого проекта построены две модельные установки — модель магнита токамака «Т-14» в 1:10 величины и исследовательский токамак «Т-13».

На модели магнитной системы проводятся испытания на прочность. Ведь давление магнитного поля при 20 Тл

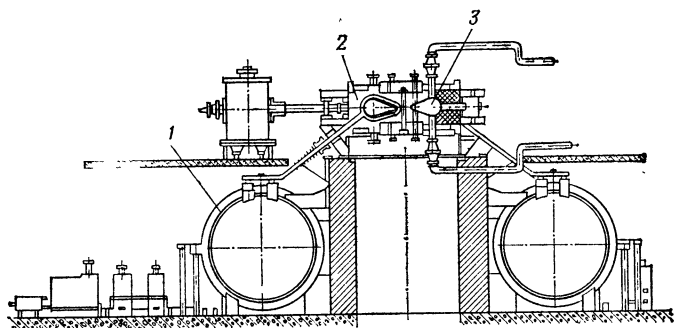


Рис. 7.4. Проект токамака «Т-14»: 1 — индуктивный накопитель энергии; 2 — катушки токамака; 3 — плазма.

достигает 1600 атм и возникает оно внезапно, в виде удара. Создать обмотки магнита, способные выдержать удар такой силы, очень непросто.

На токамаке «Т-13» магнитное поле в процессе сжатия плазмы может нарастать до 1,7 Тл. Сжатие плазмы происходит одновременно и по большому, и по малому радиусу тора. С помощью дополнительных обмоток можно менять форму поперечного сечения плазмы — делать его либо круглым, либо вытянутым вдоль вертикальной оси. Правда, теоретики предсказывают, что в последнем случае устойчивость плазмы в процессе сжатия должна быть хуже.

Самые большие надежды на достижение желанной цели — получение плазмы с термоядерными параметрами — связаны с сооружением нового крупнейшего советского токамака «Т-15».

Это будет грандиозная установка. Объем плазмы в ней достигнет 23 м³. Большой радиус тора будет 2,4 м, а радиус плазмы 0,7 м. Магнитная система токамака «Т-15» будет сделана из сверхпроводника. Здесь будет использован опыт, полученный на токамаке «Т-7». Индукция магнитного поля достигнет 5,0 Тл. Для предварительного нагрева и удержания плазмы по ней будет течь ток в 2 МА.

Для дополнительного нагрева плазмы и доведения ее температуры до точки зажигания термоядерной реакции будут использованы пучки быстрых атомов мощностью 10 МВт и еще 4 МВт мощности будут вложены с помощью радиоволн.

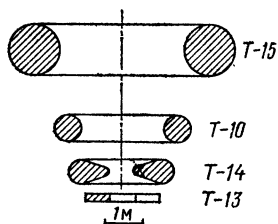


Рис. 7.5. Сравнение размеров плазмы в советских токамаках.

Насколько существенным будет новый шаг, связанный с сооружением токамака «Т-15», видно из рис. 7.5, где показаны в разрезе размеры плазмы в новых советских токамаках «Т-13», «Т-14», «Т-15». Там же для сравнения показан и крупнейший современный токамак «Т-10».

Естественно, сооружение столь крупных установок требует длительного времени. Нетерпеливые молодые физики из Института атомной энергии имени И. В. Курчатова сложили шуточную песенку, в которой для ускорения прогресса предлагают построить сразу «Т-34» — «он никогда не подводил!».

ГЛАВА VIII

ВОЗРОЖДЕНИЕ СТЕЛЛАТОРОВ

А все-таки, почему же он не работает?

А теперь давайте вернемся в 1969 год, где мы оставили стеллараторы в тяжелое для них время.

Неудача американского стелларатора «С» поставила в трудное положение исследования на стеллараторах и в других странах. Низкая температура плазмы и мрачные предсказания относительно времени удержания при термоядерных температурах выглядели особенно бесперспективно на фоне триумфального успеха токамаков.

Хотя с теоретической точки зрения разница между стеллараторами и токамаками не так уж велика. Структура удерживающего плазму магнитного поля, по существу, одинакова — магнитные силовые линии, вращаясь по винтовой линии при обходе вокруг тора, создают вложенные одна в другую замкнутые магнитные поверхности (рис. 8.1).

Однако теория теорией, а решающее слово всегда за практикой. Все внимание руководителей термоядерных исследований в разных странах сосредоточилось на токамаках. На стеллараторы повеяло холодом.

Стеллараторная программа держалась только на энтузиазме отдельных ученых. Особенно большую роль в спасении стеллараторов сыграл выдающийся советский

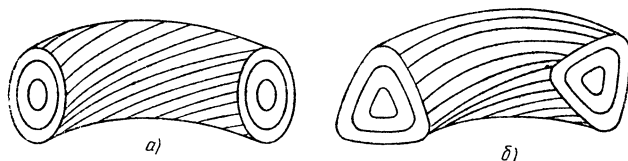


Рис. 8.1. Структура магнитного поля токамака (а) и стелларатора (б).

ученый профессор Матвей Самсонович Рабинович — заведующий лабораторией физики плазмы в Физическом институте Академии наук СССР, где велись исследования на стеллараторе «Л-1».

Основываясь на теоретических соображениях и результатах экспериментов на маленьких стеллараторах — немецком «Вандельштейн-2» и советском «Л-1», он убеждал своих коллег в СССР и других странах не прекращать исследования, а наоборот, постараться как можно скорее разобраться в причинах неудачи американского стелларатора и идти дальше.

Благодаря мужеству и настойчивости М. С. Рабиновича, а также научной проницательности руководителя советской термоядерной программы академика Л. А. Арцимовича, стеллараторная программа в СССР не была прекращена.

Ссылаясь на авторитетный пример советской науки, стеллараторную программу удалось отстоять также ученым в Англии и ФРГ.

Чтобы понять причины плохого удержания плазмы, прежде всего нужно было изучить структуру удерживающего магнитного поля. Ученые тщательно исследовали структуру магнитных поверхностей в стеллараторах. И получили неожиданный результат. Оказалось, что привычная картина вложенных друг в друга магнитных поверхностей с постепенно нарастающим углом прокручивания силовых линий (см. рис. 8.1) существует лишь до тех пор, пока стелларатор не подвергается действию каких-

либо возмущающих полей. А возмущающие поля возникают очень просто. Их порождает малейшая неточность в изготовлении обмоток магнитного поля стелларатора, любые внешние магнитные поля, например рассеянное поле трансформатора для возбуждения в плазме тока.

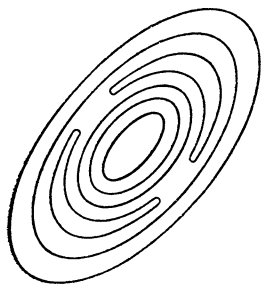


Рис. 8.2. Образование «островов» в структуре магнитного поля стелларатора вблизи магнитной поверхности, для которой угол прокручивания линий индукции $i \rightarrow 1/2$.

Структура магнитного поля стелларатора оказалась чрезвычайно чувствительна к возмущающим полям, особенно в тех местах, где силовая линия после нескольких оборотов попадает снова в ту же точку и замыкается сама на себя.

Если возмущающие поля даже чуть-чуть смещают такую силовую линию, она перестает попадать в ту же точку, идет дальше, и структура магнитных поверхностей в этом месте заметно меняется. Вместо такой магнитной поверхности образуются, как говорят физики, острова (рис. 8.2).

Силовая линия заметно отклоняется от исходной магнитной поверхности вглубь и наружу. Это очень плохо с точки зрения удержания заряженных частиц плазмы. Попав на такую силовую линию, заряженная частица через несколько оборотов оказывается на внешней стороне от магнитной поверхности, заметно приблизившись к стенке. Если в этот момент заряженная частица столкнется с другой, она легко может перескочить на силовую линию, относящуюся к другой магнитной поверхности и, таким образом, существенно продвинуться наружу.

Образование островов на магнитных поверхностях происходит уже при величине возмущающих полей в несколько десятитысячных от величины основного магнитного поля. А это значит, что при изготовлении стелларатора все его детали и особенно магнитная обмотка должны быть сделаны с необыкновенной точностью. Ошибка в одну десятитысячную уже может оказаться роковой.

Заранее такого никто предположить не мог, и стеллараторы делали с той точностью, которая обычно принята в машиностроении.

Поэтому неудивительно, что магнитные обмотки в первых стеллараторах имели множество отклонений и неточ-

ностей. Из-за этого структура магнитных поверхностей в них была нарушена довольно сильно. Так что причина плохого удержания плазмы в первых стеллараторах и, в частности, в американском стеллараторе «С» была, наконец, выяснена. Чтобы исправить положение, на одном из советских стеллараторов «ТОР-2» сделали дополнительные компенсирующие обмотки. Величину и направление магнитного поля, создаваемого этими обмотками, старались сделать такими, чтобы в точности компенсировать нежелательные возмущающие поля, возникающие из-за неточностей обмоток основного поля. Это в некоторой степени удалось, и время удержания плазмы в стеллараторе несколько возросло.

**Чем заплатки ставить,
лучше новое шить!**

Естественно, полностью компенсировать все огрехи и неточности магнитного поля было довольно трудно. Решили построить новый стелларатор. И делать его сразу с большой точностью.

Электротехникам не легче, чем физикам

Построить хороший стелларатор оказалось не так-то просто. Сложная конфигурация винтовой обмотки, немыслимые с точки зрения обычной технологии металлообработки требования к точности изготовления превратили изготовление стелларатора в проблему. К тому же речь шла всего лишь об экспериментальной установке, сооружаемой в одном экземпляре.

В конце концов физикам пришлось заняться изготовлением винтовой обмотки собственными руками и к 1975 г. стелларатор нового поколения в Физическом институте Академии наук СССР был построен (рис. 8.3).

Его называли стелларатор «Л-2». Размеры нового стелларатора были довольно скромные — большой радиус тора 1 м, вакуумная камера диаметром 35 см, магнитные поверхности для удержания плазмы имели эллиптическую форму. Размеры этого эллипса 28×16 см, так что площадь поперечного его сечения была равна площади круга с радиусом 11,5 см.

Примерно такие же размеры плазмы были на печально знаменитом стеллараторе «С». Но в отличие от него винтовая обмотка стелларатора «Л-2» была изготовлена

с высокой точностью. Качество магнитных поверхностей было тщательно проконтролировано с помощью электронных пучков, и все перекосы и отклонения в настройке магнитной системы устранены.

Примерно в это же время происходило сооружение стеллараторов нового поколения в Англии («Клео») и ФРГ

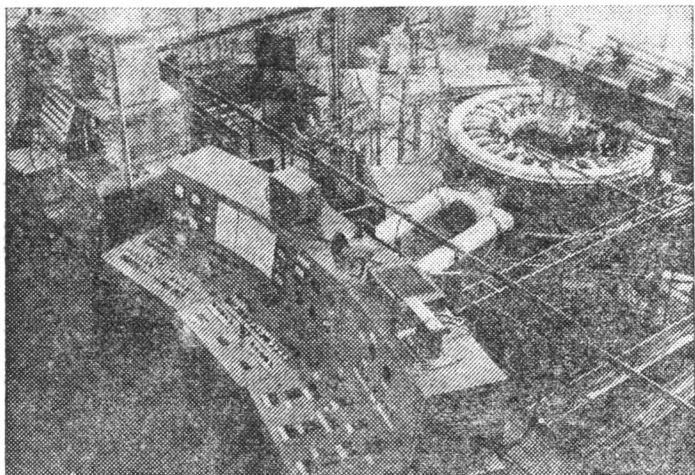


Рис. 8.3. Стелларатор «J-2».

(«Вандельштейн-7А»). Все три установки были готовы к экспериментам с плазмой практически одновременно — в 1975 г.

Для создания и нагрева плазмы во всех трех установках использовался электрический ток, текущий по плазме. Величину этого тока приходилось ограничивать на уровне 20—30 кА, чтобы возникающее магнитное поле не слишком искажало структуру поля стелларатора. Это очень небольшой ток для установок такого масштаба. В токамаках таких же размеров ток обычно достигал 100—200 кА.

Тем не менее нагрев плазмы током получался весьма значительным. Температура плазмы легко поднималась до нескольких миллионов градусов. Температура плазмы, близкая к той, которая бывает в токамаках, на стеллараторах получается при значительно меньшей мощности нагрева. Из этого факта с необходимостью следовало, что

потери энергии в стеллараторах меньше, чем в токамаках.

Этот результат был получен практически одновременно на трех установках в СССР, Англии и ФРГ и доложен на ближайшей Международной конференции в Бертесгадене (ФРГ) в 1976 г. А через два года на очередной кон-

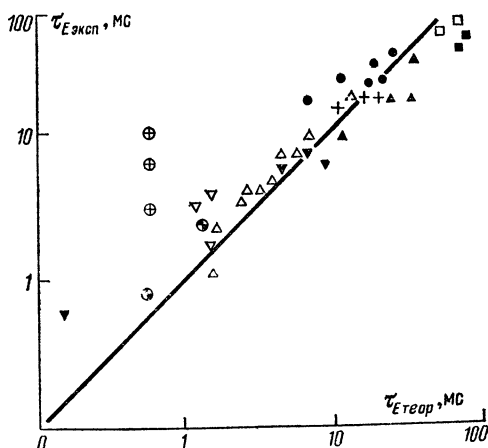


Рис. 8.4. Энергетическое время по формуле Мирнова (ось абсцисс) и из эксперимента (ось ординат) для различных токамаков и для стелларатора «Л-2» (⊕).

ференции в Инсбруке (Австрия) были представлены уже подробные данные, позволяющие сравнивать удержание плазмы в токамаке и стеллараторе по многим параметрам.

К этому времени в токамаках зависимость времени жизни плазмы от различных параметров была исследована уже довольно подробно. Появились эмпирические формулы, обобщающие этот опыт. В этих формулах учитывалось влияние магнитного поля, тока, размера плазмы, ее плотности и т. д. На рис. 8.4 показаны результаты расчета времени жизни плазмы по одной из таких формул, предложенной советским физиком С. В. Мирновым. Формула Мирнова довольно хорошо описывает зависимость энергетического времени жизни от наиболее важных параметров для большинства токамаков. Это видно из того, что экспериментальные точки для токамаков хорошо ложатся на прямую на рис. 8.4, рассчитанную по формуле Мирнова.

На том же рисунке кружками с крестом внутри показаны данные по времени удержания энергии плазмы в стеллараторе «Л-2».

Из сравнения видно, что время удержания в стеллараторе значительно больше, чем можно ожидать для токамака. При тех значениях параметров плазмы и магнитного поля, которые были в стеллараторе «Л-2», время жизни энергии по формуле Мирнова получается немного меньше 0,001 с. И эксперимент на токамаке «ТМ-3», который работал как раз при таких параметрах, подтверждает это. А в стеллараторе «Л-2» время жизни энергии получалось в 3, а то и в 10 раз больше!

Когда стелларатор работает как стелларатор

Нагрев плазмы электрическим током хотя и требует самого простейшего оборудования по сравнению с другими методами, не очень-то подходит для

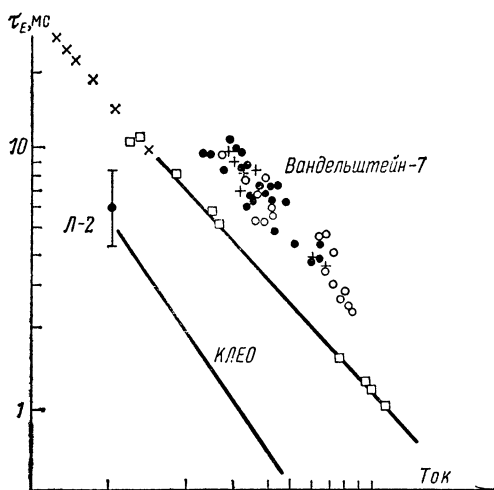


Рис. 8.5. Зависимость времени удержания плазмы от тока.

стеллараторов, потому что магнитное поле тока искажает поле стелларатора и приводит к ухудшению удержания плазмы. На рис. 8.5 показано, как падает время удержания энергии в стеллараторах при увеличении тока. Но на эту же картинку можно посмотреть и с другого конца — смотрите, как быстро улучшается время удержания плаз-

мы в стеллараторах с уменьшением тока! А что если его совсем выключить?

Но ведь плазму чем-то греть надо. Поэтому, прежде чем выключить ток, надо разработать методы нагрева плазмы без тока. Поскольку структура магнитного поля в токамаках и стеллараторах почти одна и та же, для нагрева плазмы в стеллараторах можно использовать те же методы, что и в токамаках.

Первыми попытку получить бестоковую плазму в стеллараторе предприняли англичане на стеллараторе «Клео». Для нагрева плазмы вместо тока они использовали генератор радиоволн мощностью 15 кВт, работавший на частоте электронного циклотронного резонанса.

В принципе эксперимент удался — удалось полностью выключить ток в плазме, и плазма продолжала жить в ловушке, поддерживаемая только энергией радиоволн. При такой маленькой мощности генератора температура плазмы установилась на довольно низком уровне — 600 тысяч градусов, но не падала до нуля.

Более впечатляющие результаты по нагреву плазмы радиоволнами получили японские физики на стеллараторе «Гелиотрон-Е», мощность генератора которого была 200 кВт, соответственно и температура электронов получилась гораздо выше — 5 миллионов градусов.

Физики из Харьковского физико-технического института пошли по другому пути. На стеллараторе «Ураган-2» они поставили опыт по нагреву плазмы радиоволнами, находящимися в резонансе не с электронами, а с ионами. В опытах на «Урагане-2» задачи получения бестокового режима не ставилось. Зато нагрев ионов получился очень хорошо — была достигнута температура ионов 4 миллиона градусов, что в 4 раза выше, чем при нагреве только током, без радиоволн.

Первые опыты по нагреву плазмы пучками нейтральных атомов были проведены на немецком стеллараторе «Вандельштейн-7А», где специальных вводов для атомных пучков предусмотрено не было. Поэтому немецким физикам пришлось пустить пучок атомов почти перпендикулярно к плазме — под углом 84° .

В этом случае путь пучка в плазме невелик — всего лишь 20 см. Чтобы заметная доля атомов пучка на этом пути испытала столкновение с частицами плазмы, плотность плазмы должна быть очень большой: $n \geq 10^{20} \text{ м}^{-3}$. Это та самая плотность, которую, как предполагается, плазма будет иметь в будущем термоядерном реакторе.

Получить такую плотность в сравнительно небольшой современной установке очень трудно. В решении этой задачи очень пригодилось замечательное свойство стелларатора — устойчивость против срывов. В токамаке при тех же условиях такую плотность получить бы не удалось.

В стеллараторе «Вандельштейн-7А» плазму нужной плотности получали, пропуская по ней электрический ток. Эта плазма служила мишенью для пучка нейтральных атомов с энергией 27 кэВ. Таких пучков было четыре. Суммарная мощность во всех четырех пучках превышает 1000 кВт. Но только около 30% энергии пучка выделяется в плазме. Большая часть быстрых атомов пучка пролетает плазму насквозь, не испытав ни одного столкновения с частицами плазмы.

Как бы то ни было — плазма нагревается. И еще как! Температура ионов плазмы поднялась до 7 миллионов градусов.

Обладая столь мощным источником нагрева, немецкие физики, естественно, тут же попытались выключить текущий по плазме электрический ток, который, как вы вероятно помните, они использовали для приготовления плазмы перед включением пучков. По мере уменьшения тока в плазме наращивали ток в винтовых обмотках стелларатора с тем, чтобы суммарный угол прокручивания все время был больше чем $1/2$. Плазма оставалась спокойной, и ток в плазме удалось снизить почти до нуля. Правда, совсем до нуля снизить ток все равно не удалось. И это очень интересно. Оказалось, что при удержании плазмы в стеллараторе ток в ней возникает сам собой, даже если к плазме извне не приложено никакого напряжения. На стеллараторе «Вандельштейн-7А» такой самопроизвольный ток достигал 1000 А.

Итак, бестоковый режим удержания плазмы в стеллараторе получен. Ну и как? Замечательно! Время удержания плазмы резко возросло. Настолько, что его даже трудно измерить — длительность работы пучков нейтральных атомов для этого недостаточно велика. Во всяком случае оно возросло во много раз по сравнению с режимом, когда по плазме тек электрический ток.

Но нет и добра без худа. Такое большое время удержания частиц в стеллараторе тут же привело к новым неприятностям.

В самом центре плазменного столба, где самая высокая температура, начали накапливаться примеси и путем излучения охлаждать плазму. Да так сильно, что начиная

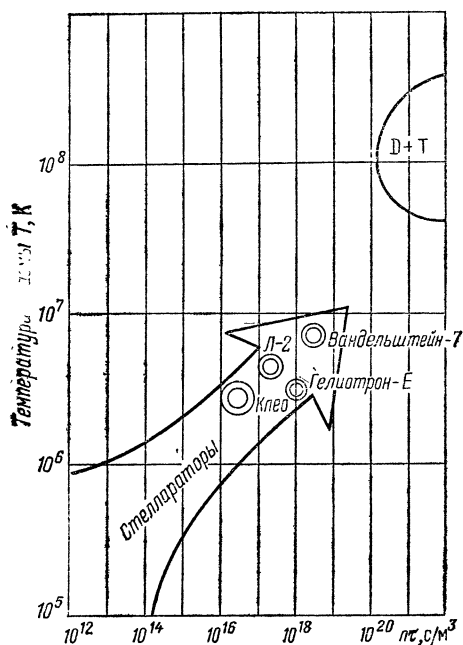


Рис. 8.6. Триумф стеллараторов — прорыв по параметру $n\tau$ почти до термоядерного уровня.

с какого-то момента температура плазмы в центре падала, несмотря на продолжавшуюся инъекцию пучков. Оказалось, что это кислород. По-видимому, ионы кислорода попадают в водородные пучки в процессе приготвления и ускорения ионов водорода. А затем часть ионов кислорода перезаряжается вместе с ионами водорода и попадает в плазму. Благодаря большому времени удержания частиц в бестоковом стеллараторе ионы кислорода, попадающие с пучком в плазму, накапливаются в плазме и создают потери на излучение. Борьба с этим явлением — предмет дальнейших экспериментов. А пока можно поздравить физиков, работающих по стеллараторному направлению, с выдающимся достижением. По оценкам время удержания энергии в бестоковом стеллараторе достигло 0,035 с и это при плотности, равной плотности в будущем реакторе $n=10^{20} \text{ м}^{-3}$. Произведение $n\tau$ достигло уже значения $3,5 \cdot 10^{18} \text{ с/м}^3$ — всего лишь в 30 раз меньше того, что нужно для термоядерного реактора. И это в установках с радиусом плазмы около 10 см (рис. 8.6).

А так как время жизни растет, как квадрат радиуса плазмы, то при радиусе плазмы, равном 60 см. критерий Лоусона по ит будет выполнен!

Следующий шаг в стеллараторной программе

Достигнув к настоящему времени столь впечатляющих успехов, физики, работающие по стеллараторной программе, с энтузиазмом готовятся к следующему шагу на пути к термоядерному реактору. И опять, как это было несколько лет назад, создание стеллараторов нового поколения начинается одновременно в нескольких странах.

В ФРГ стелларатор нового поколения проектируется в модульном исполнении, т. е. из одинаковых частей — модулей. Он будет иметь форму не круглого, а пятиугольного тора. Форма катушек будет извилистой, прямо-таки экзотической. Изготовить такие катушки весьма непросто. Эта задача несколько облегчается стандартизацией — используется только четыре разных типа катушек. Стелларатор проектируется довольно большой — большой радиус установки 2 м, а радиус плазмы 0,22 м. Для нагрева плазмы предполагается использовать радиоволны и пучки нейтральных атомов. И тот, и другой метод должен обеспечить введение в плазму мощности, превышающей 10 МВт.

Естественно, сооружение такой установки займет несколько лет и потребует громадных капитальных вложений. Зато это будет весьма существенный шаг к термоядерному реактору — стелларатору; не только произойдет дальнейшее приближение параметров плазмы к термоядерным условиям, но и будет приобретен опыт сооружения и эксплуатации стелларатора с модульной магнитной системой.

В Советском Союзе стеллараторы нового поколения по-прежнему используют винтовую обмотку, но используют ее не совсем так, как в «классическом» стеллараторе, а в так называемом, торсатронном варианте. В этой схеме ток в обоих проводниках винтовой обмотки течет в одном и том же направлении.

Такая винтовая обмотка производит сразу и продольное, и винтовое поле, так что катушки продольного поля не нужны. Правда, появляется очень сильное вертикаль-

ное поле, которое приходится убирать специальной компенсирующей обмоткой с довольно сильным током в ней.

Торсатронный тип стеллараторов был предложен в 1968 г. группой французских ученых во главе с Гурдоном. Основное достоинство торсатронов в том, что, специально подбирая шаг винтовой обмотки, можно значи-

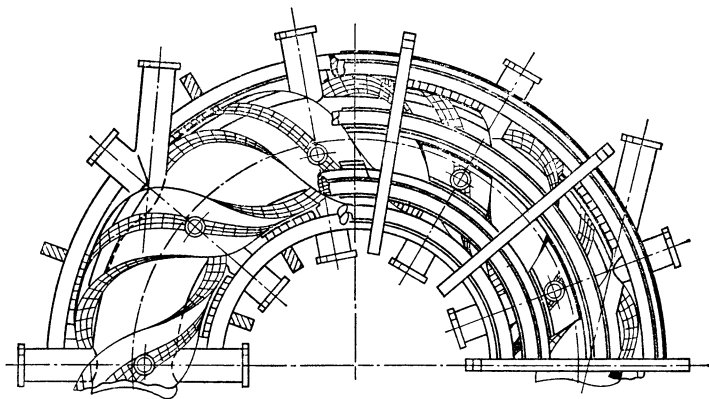


Рис. 8.7. Схема конструкции стелларатора «Л-3».

тельно снизить силы, действующие на элементы винтовой обмотки, и тем существенно облегчить конструирование стелларатора.

В Советском Союзе создаются два стелларатора нового поколения: стелларатор «Л-3» в Физическом институте Академии наук СССР (рис. 8.7) и «Ураган-3».

Стелларатор «Л-3» придет на смену стелларатору «Л-2». Его торсатронная винтовая обмотка будет состоять из двух медных шин с постоянным углом намотки по отношению к оси тора. Величина этого угла выбрана такой, чтобы магнитная поверхность, в которой удерживается плазма, заполняла как можно большую часть вакуумной камеры. Это необходимо для наиболее эффективного использования объема магнитного поля. В стеллараторе «Л-3» плазма будет занимать 70% объема магнитного поля. Так что и по этому параметру стеллараторы сравняются с лучшими из токамаков.

Размеры плазмы в стеллараторе «Л-3» будут не особенно велики — большой радиус 1,6 м, а малый радиус 25 см. Это даже меньше, чем у крупнейших современных

токамаков, не говоря уже о будущих. Но благодаря высоким удерживающим свойствам стеллараторного поля время жизни и параметры плазмы и при таких размерах должны быть довольно высокими.

Основная задача нового харьковского стелларатора «Ураган-3» — проверить на практике еще одно преимущество стеллараторов — возможность использования для

устройства диверторов того же самого винтового поля, что и для удержания плазмы.

На рис. 8.8 стелларатор «Ураган-3» показан в разрезе. Он имеет трехзаходную винтовую обмотку торсатронного типа. Это значит, что имеются всего три винтовых шины. Ток по всем трем шинам течет в одном направлении. Структура магнитного поля довольно сложная. В центральной области образуются магнитные поверхности приблизительно треугольной формы. Внутри этих магнитных поверхностей удерживается плазма. Чем

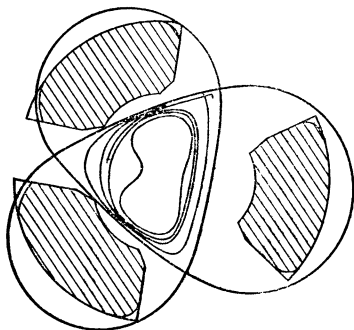


Рис. 8.8. Расположение магнитных поверхностей в поперечном сечении стелларатора «Ураган-3».

дальше от центра, тем все более острыми становятся углы поверхностей. Наконец, треугольник разрывается в углах, и силовые линии магнитного поля уже не образуют замкнутой магнитной поверхности, а начинают обходить вокруг шин винтовой обмотки. Частицы плазмы, попав на такую силовую линию, уходят от остальной плазмы очень далеко. Обычно винтовые обмотки в стеллараторе располагаются снаружи вакуумной камеры. Поэтому уходящие из плазмы частицы, попав на такую силовую линию, натыкаются на стенку вакуумной камеры и выбивают из нее атомы примесей. Чтобы этого не случилось, в стеллараторе «Ураган-3» вакуумная камера сделана очень большой, так что шины винтовой обмотки находятся в вакууме. А с наружной стороны винтовых шин устроен приемник для частиц плазмы в виде желоба с узким входом и очень мощной откачкой. Частицы плазмы, попадая в приемник, выбивают из стенки атомы примесей. Но этим атомам довольно трудно найти дорогу обратно в плазму. Большая их часть попадает снова на стенки желоба. Но в отличие от

частиц плазмы энергия их невелика, и они прилипают к стенке, не выбивая из нее новых частиц. Чтобы усилить эффект прилипания, стенки желоба непрерывно покрывают распыленным титаном.

Решение, найденное харьковскими физиками при проектировании стелларатора «Ураган-3», очень изящно. Получаются сразу три дивертора, очень больших — по всей длине установки. И при этом не нужно никаких дополнительных обмоток. Если эффективность такого дивертора по снижению потока примесей в плазму окажется достаточно высокой, это будет еще одним, и очень важным, преимуществом стеллараторов как реакторов.

Установка «Ураган-3» в настоящее время уже вступила в строй. Основная задача проводимых на ней экспериментов нацелена на исследование поведения примесей в такой системе и эффективности работы дивертора.

Снова оргвыводы

Успех стеллараторов поставил руководителей термоядерной программы США в трудное положение. Весьма решительные выводы, сделанные в 1969 г. в связи с успехами советских исследований на токамаках, привели к тому, что сейчас в США имеется около двадцати токамаков и ни одного стелларатора. Теперь приходится делать оргвыводы в противоположную сторону.

Символично, что один из первых проектов стеллараторов нового поколения разрабатывается в лаборатории физики плазмы Принстонского университета. Этот проект предусматривает переделку в стелларатор рекордсмена среди токамаков — токамака «ПЛТ». Того самого, на котором был установлен рекорд по нагреву ионов, — 60 миллионов градусов. Кроме этой лаборатории, в возрождающейся стеллараторной программе США участвуют Масачусетский технологический институт, Висконсинский университет и Национальная исследовательская лаборатория в Окридже. Проекты новых стеллараторов в общем повторяют основные идеи советских и немецких стеллараторов, но размеры этих установок планируется сделать в 1,5–2 раза больше. В середине 1983 г. пришло сообщение, что Национальная исследовательская лаборатория в Окридже получила 15 миллионов долларов на сооружение стелларатора. Так что проекты возрождения американской стеллараторной программы становятся на реальную почву.

ГЛАВА IX

ИНЕРЦИОННОЕ УДЕРЖАНИЕ

Многолетние работы по усовершенствованию магнитных ловушек близятся, как мы видели в предыдущих главах, к завершению. Время удержания плазмы в лучших из них уже достигает 0,1 с. Еще немного, еще чуть-чуть, и нужное для выполнения критерия Лоусона $n\tau > 2 \cdot 10^{20}$ с/м³ время удержания будет достигнуто. На это «чуть-чуть» в прогнозах развития термоядерных исследований в направлении магнитного удержания отводится лет этак 15–20. И это можно понять. Хотя за предыдущие 30 лет время удержания плазмы в магнитных ловушках возросло в десятки тысяч раз, каждый новый шаг дается все труднее. Это похоже на то, как сокращается время пробега стометровой дистанции по мере тренировки спортсмена. Сократить время от 20 до 15 с можно довольно быстро, а вот от 11 до 10 с гораздо сложнее. Поэтому, несмотря на успехи магнитного удержания плазмы, поиски других путей к термоядерному синтезу не прекращаются.

Различные направления атаки на эту проблему можно рассмотреть на карте в координатах плотность — время удержания (рис. 9.1). В этих координатах рубеж, который нужно преодолеть — критерий Лоусона $n\tau > 2 \cdot 10^{20}$ с/м³, выглядит прямой линией.

К рубежу УТС идут, как видно на карте, разными путями. И это понятно, так как для термоядерного реактора важно только само произведение $n\tau$, а выбирать значения n и τ можно по-разному.

Одни предпочитали иметь дело с плазмой малой плотности. С нею надеялись легко справиться, но удерживать ее надо в течение длительного времени. Этим путем пошли создатели самых удачных на сегодняшний день магнитных ловушек — токамаков и стеллараторов. Плазму берут с плотностью $n \approx 10^{20}$ м⁻³. Ее давление при термоядерной температуре составляет всего несколько атмосфер, и магнитное поле, достаточно сильное, чтобы удерживать такую плазму, создать нетрудно. Но удерживать плазму нужно долго — целую секунду, пока же она просачивается сквозь магнитное поле и удирает из ловушки в 20 раз быстрее.

Другим нравится очень плотная плазма. В Институте атомной энергии имени И. В. Курчатова создана установка «плазменный фокус». В плазменном фокусе плотность достигает $n \approx 10^{24}$ м⁻³, и, значит, удерживать плазму нуж-

но всего лишь в течение десяти тысячной доли секунды. Но и эта задача непроста — пока что время сохранения плазмы на опыте в десятки раз меньше.

Можно пойти еще дальше по этому пути — взять плазму с плотностью, скажем $n \approx 10^{29} \text{ м}^{-3}$. Тогда удерживать

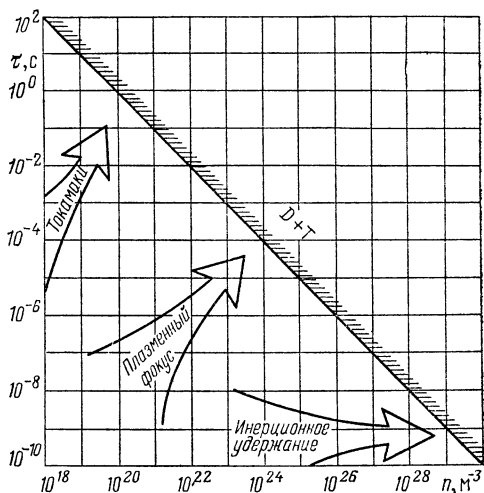


Рис. 9.1. Еще одна карта поля боя.

ее нужно будет всего лишь миллиардную долю секунды... Только вот чем удерживать? При такой плотности и при температуре 100 миллионов градусов давление плазмы превысит миллиард атмосфер, и ее уж ничем не удержишь. Во всяком случае, магнитные поля, которые мы умеем сейчас создавать, здесь никак не помогут.

А может быть, совсем не удерживать плазму?

Эта идея возникла даже раньше, чем идея магнитного удержания. Еще в те годы, когда создавалась водородная бомба, было обнаружено, что при большой плотности и температуре 100 миллионов градусов, когда давление достигает миллионов атмосфер и плазму ничем не удержишь, она разлетается очень быстро, но все-таки не мгновенно. Мгновенному разлету препятствуют силы инерции и требуется несколько миллионных долей секунды, чтобы преодолеть действие этих сил. За это

время в плазме успевает выделиться колоссальная энергия. Этот способ «удержания» плазмы, когда ее на самом деле ничто не удерживает, получил название инерционного.

Несмотря на изумительную простоту метода инерционного удержания, в первые годы работы над проблемой УТС о нем, казалось, забыли. Дело в том, что не было способа нагреть плазму до термоядерной температуры за то короткое время, которое дает инерционное удержание. Вернее, один способ был — взрыв уранового заряда, но он вел к совершенно неуправляемому синтезу.

Об инерционном удержании вспомнили только тогда, когда появились лазеры. Замечательное свойство лазерного луча — способность концентрировать колоссальную мощность в небольшом объеме — немедленно породило идею использовать лазерный луч для быстрого нагревания небольших крупинок вещества до термоядерной температуры. При этом тоже произойдет взрыв, но если крупинка будет достаточно мала, то взрыв получится несильным и его энергию можно использовать в мирных целях.

Идея эта возникла одновременно в разных странах в начале 60-х годов и до 1972 г. разрабатывалась в условиях секретности, как было когда-то и с идеей магнитного удержания. В 1972 г. завеса секретности была снята, а в 1973 г. на Международной конференции по физике плазмы и УТС в Москве состоялся широкий международный обмен информацией и оказалось, что советские и американские физики пришли к одним и тем же идеям. Американцы дальше продвинулись в машинных расчетах процессов нагрева плазмы с помощью лазерного луча, советские ученые ушли вперед в экспериментальных исследованиях.

В лабораториях Физического института АН СССР под руководством академиков Н. Г. Басова и А. М. Прохорова к этому времени уже работало несколько установок, и на них впервые удалось создать и нагреть плазму с помощью лазеров.

Первые прикидки

Вначале схема лазерного термоядерного реактора представлялась очень простой. Берем смесь дейтерия и трития, замораживаем ее, готовим из твердой смеси небольшой шарик, затем фокусируем на него луч достаточно мощного лазера — вот и все.

Плотность твердого водорода $n \approx 4 \cdot 10^{28} \text{ м}^{-3}$. Значит, чтобы получить $nt \approx 10^{20} \text{ с/м}^3$, требуется время удержания $t \approx 2,5 \cdot 10^{-9} \text{ с}$ (2,5 миллиардных доли секунды, или, короче, 2,5 нс). Если нагреть крупинку из смеси твердого дейтерия и трития до температуры 100 миллионов градусов, то она будет разлетаться со скоростью $v \approx 10^6 \text{ м/с}$. Время разлета зависит от размеров крупинки: $t = r/v$. Чтобы получить $t \approx 2,5 \cdot 10^{-9} \text{ с}$, нужно взять крупинку радиусом 2,5 мм, т. е. примерно размером с горошину. Вот такой миниатюрный получается реактор! Правда, еще требуется лазер. Какова должна быть длительность вспышки лазера, мы уже выяснили — не больше чем 2,5 нс. А какой следует быть энергии излучения? На нагрев шарика из смеси дейтерия и трития радиусом 2,5 мм до 100 миллионов градусов требуется $12,3 \cdot 10^6 \text{ Дж}$ энергии. Да...

Что же делать?

Такие расчеты были сделаны уже в начале 60-х годов, когда лазеры только-только появились. Уже тогда длительность лазерного импульса составляла всего 20—30 нс и было ясно, как сделать ее короче. Но вот энергия... Энергия лазерного импульса в то время измерялась единицами джоулей.

Значит, прежде чем начинать эксперимент, надо было что-то придумать, чтобы снизить требуемую для нагрева энергию до хоть сколько-нибудь реального уровня. И идеи появились.

Огромные числа получались из-за того, что дейтерий-тритиевая горошина — мишень, в которую будет стрелять лазер, слишком велика. Однако если ее уменьшить, то уменьшится и время разлета, и критерий Лоусона $nt \approx 10^{20} \text{ с/м}^3$ не будет выполнен. Но что если соответственно увеличить плотность n ? Сжимать горошину в тот момент, когда в нее будет стрелять лазер?

Хорошо, только чем же сжимать? А с помощью самого лазера. Ведь вся горошина не прогреется сразу, сначала нагреется самый внешний слой. Он испарится, превратится в плазму и улетит прочь. При этом возникнет сила отдачи, как в реактивном двигателе, которая будет давить на горошину с той стороны, откуда светит лазер. Если взять много лазеров и облучать горошину со всех сторон, то реактивное давление вызовет всестороннее сжатие и плотность возрастет. Детальные расчеты показали, что реактивные силы развивают давление в сотни миллио-

нов атмосфер и действительно могут существенно повысить плотность. Оказалось, что если с помощью сжатия увеличить плотность вещества в центре крупинки в 100 раз, то требуемая энергия лазерного импульса уменьшится до одного миллиона джоулей. А при сжатии в 10 000 раз она снижается до 200 кДж.

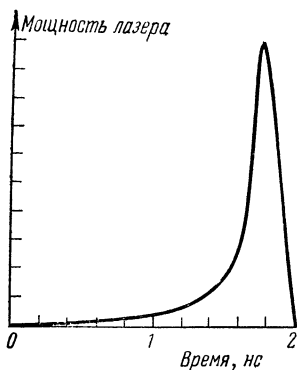


Рис. 9.2. Форма лазерного импульса для сжатия плазмы без возбуждения ударных волн.

Правда, нужны не просто 200 кДж за 2—3 нс, а очень аккуратно запрограммированный во времени импульс излучения, мощность которого должна нарастать во времени, следуя точно рассчитанному закону.

Дело в том, что если просто приложить к шарик из изотопов водорода давление даже и в сотни миллионов атмосфер, достаточно сильного сжатия не получится. В поверхностном слое, где приложено давление, возникнет ударная волна, которая устремится к центру и нагреет вещество прежде, чем до

него дойдет волна сжатия. В результате нагревания давление будет возрастать и воспрепятствует сжатию топлива до требуемого значения.

Чтобы этого не случилось, нужно предотвратить образование ударных волн. Для этого мощность лазера, а значит, и давление на поверхности водородной крупинки должны возрастать очень плавно по заранее рассчитанной кривой. Эта кривая показана на рис. 9.2. Сначала мощность лазера должна быть совсем небольшой. Зато в самом конце она должна стать прямо-таки фантастической. Почти половина всей энергии должна быть излучена в последнюю 0,1 нс. При этом первая половина энергии тратится в основном на сжатие мишени, а вторая — на нагрев до зажигания термоядерной реакции.

При сжатии в 10 000 раз плотность (по массе) дейтерий-тритиевой смеси в центре мишени достигает небывалого значения — 1 кг/см³! До сегодняшнего дня ни одного вещества с такой плотностью на Земле не было. При такой плотности развитие термоядерных реакций происходит совсем иначе, чем обычно. Образующиеся в ходе термоядерных реакций нейтроны и α -частицы (ядра ⁴He)

при такой большой плотности не вылетают за пределы мишени, а отдают значительную часть своей энергии другим частицам. Поэтому энергия лазерного импульса нужна только для сжатия мишени и первоначального нагрева до температуры зажигания. В дальнейшем температура поддерживается за счет энергии термоядерных реакций. Так что выделяющаяся энергия может в тысячи раз превышать энергию, затраченную на поджиг реакции.

Столь замечательная идея вызвала, естественно, соответствующий энтузиазм. Лазерная техника развивалась бурно, и к концу 60-х годов, когда были выполнены эти расчеты, появились лазеры с энергией импульса до 100 Дж. Итак, берем две тысячи лазеров и...

Попробуем сначала на девяти

Прежде чем строить громоздкую установку из двух тысяч лазеров, нужно было, естественно, проверить в эксперименте правильность основных идей, заложенных в расчеты.

К этому времени самое высокое давление, которое удавалось получить в лаборатории, не превышало нескольких миллионов атмосфер. И при этом плотность твердых веществ повышалась всего в несколько раз. Теперь же предстояло достичь давления во много раз большего и увеличить степень сжатия в тысячи раз. Успех опыта зависел от того, как поведет себя твердый водород при таких необычных условиях.

Были и другие неизвестные. В процессе сжатия на внешней поверхности крупинки возникает плазма, нагревая до нескольких миллионов градусов. Успех опыта зависел еще и от того, насколько правильно было учтено в расчетах поведение этой плазмы, а плазма — весьма коварная штука. Из опыта борьбы с нею в экспериментах по магнитному удержанию известно, что полностью предсказывать ее поведение никому не удавалось.

Наиболее важный вопрос — а будет ли плазма поглощать лазерное излучение?

Обычный механизм поглощения — за счет столкновений частиц между собой при высокой температуре становится не эффективен, так как частота столкновений при повышении температуры быстро падает. Так что, если не появятся новые механизмы поглощения, плазма станет прозрачной для лазерного света задолго до того, как температура достигнет нужной величины. К счастью, к этому времени физики накопили уже большой опыт

в обращении с плазмой и кое-что о ее свойствах и поведении уже было известно. В частности, вопрос о поглощении плазмой энергии электромагнитных волн исследовался уже давно и довольно подробно в связи с проблемой нагрева плазмы электромагнитными волнами радиоволнового диапазона.

В этих исследованиях было установлено, что кроме классического поглощения за счет столкновений, где каждая частица в плазме действует сама по себе, в плазме возможны совсем другие механизмы поглощения, когда частицы движутся коллективно и согласованно.

Уже давно было известно, что такие коллективные движения электронов в плазме существуют. Они приводят, например, к отражению электромагнитных волн от плазмы. Для каждой длины волны существует определенная критическая плотность плазмы. Если плотность плазмы превышает эту величину, то электромагнитная волна в такой плазме распространяться не может. Коллективное движение электронов приводит к отражению электромагнитной волны от плазмы, как от хорошего зеркала. Свет, в том числе и свет от лазера, это те же самые электромагнитные волны. Для света с длиной волны 1,06 мкм, который излучают самые мощные лазеры на стекле с примесью неодима, критическая плотность плазмы равна 10^{27} м^{-3} . У лазера на углекислом газе длина волны равна 10,6 мкм, а критическая плотность плазмы в этом случае 10^{25} м^{-3} . Обе эти критические плотности значительно меньше, чем плотность атомов в твердом водороде $n = 4 \cdot 10^{28} \text{ м}^{-3}$. После того как первая порция водорода на поверхности нагреется, ионизуется и превратится в плазму, плотность плазмы будет спадать примерно от этого значения до нуля по мере удаления от поверхности мишени. Где-то, не доходя до поверхности мишени, будет область с плотностью плазмы 10^{25} , а где-то и 10^{27} м^{-3} . Лазерный свет на пути к поверхности мишени дойдет до этого слоя, и тут коллективные движения электронов заставят его отразиться.

В области вблизи критической плотности плазмы разыгрываются очень сложные процессы. Коллективные движения электронов не только вызывают отражение падающей волны, но еще и возбуждают колебания частиц плазмы, которые распространяются в глубь плазмы в виде плазменных и звуковых волн. Плазма — это ведь все-таки газ, хотя и состоящий из заряженных частиц, и в ней существуют, как и во всяком газе, звуковые волны.

В случае взаимодействия плазмы с световой волной от лазера все эти сложные процессы разыгрываются в очень малом пространстве — сравнимом с длиной волны лазерного света, т. е. единицы микрометра. Поэтому экспериментальное изучение этих процессов очень затруднительно.

Окончательно механизм поглощения лазерного света и процессы, которые его сопровождают, не выяснены до сих пор. Во всяком случае поглощение лазерного света происходит вблизи области, где плотность плазмы близка к критической, а не вблизи поверхности мишени. Так что возникает еще одна проблема — нужно, чтобы тепло из области поглощения достигло поверхности мишени.

Основную роль в переносе тепла играет электронная теплопроводность. Та самая электронная теплопроводность, с которой связаны основные трудности магнитного удержания, должна содействовать успеху лазерного подхода к проблеме УТС. Но как-то поведет себя плазма в этом случае?

Чтобы получить ответы на все эти вопросы не слишком дорогой ценой, в Физическом институте Академии наук СССР в лабораториях академиков Н. Г. Басова и А. М. Прохорова было построено для первых опытов несколько небольших лазеров. Самый мощный среди них состоял из девяти каналов. Каждый канал мог дать вспышку с энергией около 100 Дж. За сходство с многоногим моллюском этот лазер называли «Кальмаром». В течение нескольких лет он оставался самым крупным лазером в мире.

Девять пучков от «Кальмара» с помощью системы зеркал подвели к вакуумной камере, в центре которой помещался крохотный шарик — мишень. С помощью линз все девять пучков тщательно сфокусировали на мишень, чтобы осветить ее равномерно с девяти сторон сразу.

Чтобы не возиться со сложной техникой замораживания водорода, мишень для первых модельных опытов делали из полиэтилена, в котором водород замещен дейтерием. Тритий в этих экспериментах с небольшой энергией вообще не использовали — ведь получение термоядерной энергии тут не планировалось. Важно было проверить, в принципе, пойдут нагрев и сжатие мишени так, как предсказывают расчеты, или нет. Дейтерий в этих опытах нужен был для диагностических целей. Если бы удалось поднять температуру хоть до нескольких миллионов градусов, начались бы единичные термоядерные реакции.

И по числу родившихся в этих реакциях нейтронов можно было бы определить, какую именно температуру удалось получить. Итак, мишень представляла собой шарик из дейтерированного полиэтилена диаметром 0,2 мм.

И вот, наконец, опыты начались. Сразу же плазма проявила свой характер. С таким трудом созданный и настроенный лазер портился после первого же выстрела. Оказалось, что отраженный от плазмы свет попадал точно в выходное отверстие лазера и, проходя по всем каскадам в обратном порядке, усиливался настолько, что разрушал прибор. И чем мощнее лазер, чем лучше сфокусирован свет, тем большая доля лазерного света отражается. Пришлось изобретать специальный затвор, пропускающий свет от лазера, но отсекающий свет, отраженный плазмой. К счастью, отражение света растет с увеличением мощности лазера лишь до определенного предела, а при еще большей мощности начинает снижаться. Так что эту трудность удалось преодолеть.

Много хлопот причинили попытки добиться достаточно равномерного облучения мишени со всех сторон. Мощность всех девяти лазерных пучков и степень их фокусировки на поверхности мишени должны быть строго одинаковы — иначе равномерного всестороннего сжатия не получится.

И все-таки эти и прочие трудности удалось преодолеть. В 1972 г. в отдельных, особо удачных, выстрелах удалось достичь тридцатикратного сжатия полиэтиленовой мишени. Температура в центре мишени достигала пяти миллионов градусов, а давление — нескольких миллиардов атмосфер. При этих условиях начинались термоядерные реакции — приборы регистрировали рождение нейтронов.

И хотя нейтронов было немного — всего лишь около миллиона штук за импульс, была подтверждена принципиальная правильность основных идей лазерного УТС. Теперь можно было подумать о строительстве более мощных установок.

Вперед на штурм!

Успешное начало экспериментов по лазерному подходу к проблеме термоядерного синтеза внушило приверженцам нового направления неудержимый оптимизм.

Совпадение результатов опытов с предсказаниями теоретических расчетов позволяло с уверенностью присту-

пить к проектированию новых установок. И хотя, как следовало из расчетов, установка должна быть очень большой, сложной и дорогой, ожидаемые результаты позволяли настаивать на ее сооружении. Ведь с помощью лазера с выходной энергией в несколько сот килоджоулей можно практически вплотную подойти к решению термоядерной проблемы!

Умудренные опытом представители классического направления магнитного удержания смотрели на оптимизм энтузиастов лазерного направления довольно скептически. И. Н. Головин — один из отцов токамака — сформулировал этот скептический опыт в виде своеобразной теоремы: «Термоядерная крепость окружена со всех сторон одинаково высокой стеной. Если представителям нового направления кажется, что с их стороны стена понижее, или же что в ней есть брешь, то это свидетельствует только о молодости данного направления».

Сооружение гигантского лазера на несколько сот килоджоулей было отложено. Вместо этого решено было соорудить несколько установок на энергию около 10 кДж и провести с их помощью более детальное исследование физических процессов при нагреве плазмы лазерными пучками.

К концу 70-х годов строительство лазеров нового поколения развернулось во многих странах. Один за другим в строй вступают гигантские установки «УМИ-35», «Мишень-2», «Дельфин» в СССР, «Гелиос», «Нова», «Шива» в США. Лазеры значительно меньшего масштаба, но тоже довольно внушительные, в ФРГ, Англии, Франции.

Одновременно продолжается детальное исследование процессов, происходящих в мишени под действием лазерного света. Результаты этого исследования подтвердили широко известный среди физиков-плазменщиков афоризм «произведение оптимизма на уровень знаний есть величина постоянная». По мере накопления знаний о взаимодействии плазмы с лазерным светом оптимизм поклонников лазерного термояда начал снижаться.

Скорость переноса тепла слишком мала!

Первые неприятности начались с измерений электронной теплопроводности: она оказалась значительно (в несколько десятков раз) ниже, чем ожидали.

Причиной снижения теплопроводности оказались магнитные поля, спонтанно (самопроизвольно) рождающиеся

в плазме, облучаемой лазерным светом. Значение этих полей поразительно велико — сотни тесла. Создать такие поля преднамеренно чрезвычайно трудно. Их удастся получить на миллионные доли секунды, причем катушка, их создающая, буквально взрывается, не выдерживая возникающих при этом сил. А в лазерной плазме такие вот поля рождаются сами собой и как раз в том месте, где они совершенно не нужны! Недостаточная электронная теплопроводность уменьшает скорость испарения с поверхности мишени, а следовательно, и значение реактивной силы, сжимающей мишень. В результате для получения нужной степени сжатия придется строить гораздо более мощный лазер.

Но откуда же все-таки берутся эти спонтанные магнитные поля? Чтобы ответить на этот вопрос, пришлось провести множество экспериментов, выполнить весьма подробные измерения плотности и температуры плазмы и их изменения вокруг мишени. Оказалось, что все дело в недостаточно равномерном распределении лазерного света по поверхности мишени. В тех местах, где свет от лазера особенно ярк, температура плазмы получается выше, чем в других местах. Из-за разницы температур возникает и разница давлений. А разница давлений вызывает поток электронов точно так же, как неравномерный прогрев поверхности Земли солнечным светом порождает ветровые потоки. Электронный ветер — это то же самое, что электрический ток. Вот эти потоки и порождают магнитное поле. Ну раз причину удалось выяснить, ее можно и преодолеть. Просто в лазерном реакторе надо для облучения мишени взять побольше пучков, чтобы повысить равномерность освещения.

Скорость переноса тепла слишком велика!

Не успели физики разделаться с магнитными полями, чтобы увеличить скорость переноса тепла от зоны поглощения лазерного света к поверхности мишени, как выяснилось, что скорость переноса тепла к центральным областям мишени слишком велика! Центр мишени каким-то образом успевает прогреться раньше, чем происходит его сжатие. С самого начала такого казуса ожидали со стороны ударных волн и принимали против них специальные меры. Но оказалось, что даже и в отсутствие ударных волн центр мишени все равно успевает нагреться и хорошего сжатия не получается.

Ответственными за эту неприятность оказались быстрые электроны, которые рождаются в зоне поглощения лазерного света из-за неустойчивости плазмы.

Давление света три миллиона атмосфер!

Развитие неустойчивости плазмы в области, где поглощается лазерный свет, происходит не всегда, а только при достаточно большой интенсивности лазерного света. В современных экспериментах интенсивность лазерного света на мишени достигает фантастического значения 10^{20} Вт/м².

При такой интенсивности давление света составляет уже три миллиона атмосфер! Вот что такое лазер! Интересно вспомнить, что 75 лет назад, в начале нашего века, П. Н. Лебедеву понадобилось тончайшее искусство экспериментатора, чтобы измерить давление света.

Под действием давления света в миллионы атмосфер плазма приходит в движение. На рис. 9.3 показан спад плотности плазмы по мере удаления от мишени. На расстоянии 3 мкм от поверхности мишени плотность плазмы падает резко, скачком. Этот резкий скачок образовался в результате давления света. Вот в этой области, где давление света сравнивается с давлением плазмы, и развиваются бурные процессы. Детальный механизм этих процессов пока еще не ясен. Он интенсивно исследуется. В бурных процессах в области скачка плотности возникают могучие электрические поля. В этих электрических полях и происходит ускорение электронов. Быстрые электроны проникают затем в холодную сердцевину мишени, прогревают ее и препятствуют таким образом эффективному сжатию.

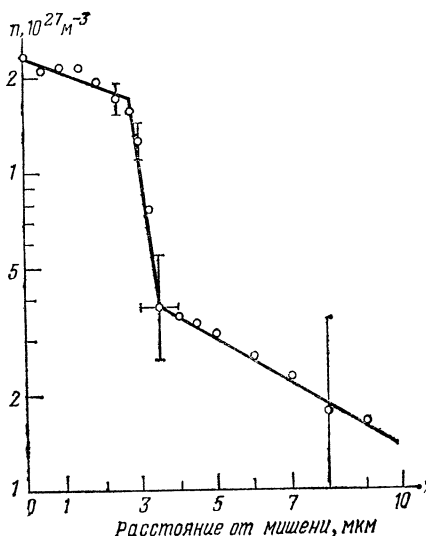


Рис. 9.3. Зависимость плотности плазмы от расстояния до поверхности мишени.

Осложнения со спонтанными магнитными полями и быстрыми электронами привели к существенной переоценке энергии лазерного импульса, гарантирующей поджиг термоядерной реакции. Она подскочила в несколько десятков раз и стала снова измеряться миллионами джоулей, поставив тем самым проект лазерного термояда на грань осуществимости. Надо было срочно искать резервы для снижения требуемой энергии.

Чем сложнее мишень, тем проще лазер

Основной резерв — усложнение мишени. Вскоре после первых успешных опытов на мишенях из сплошных твердых шариков появились более сложные мишени, представляющие собой стеклянный шарик

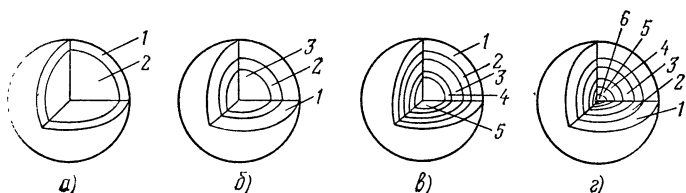


Рис. 9.4. Мишени для лазерного термоядерного синтеза: а) 1 — оболочка из стекла, 2 — газообразное DT-топливо; б) 1 — фторопласт-4, 2 — стекло, 3 — газообразное DT-топливо; в) 1 — бериллий, 2 — оболочка из тантала, 3 — пористая пластмасса, 4 — оболочка из золота, 5 — DT-топливо; г) 1 — оболочка из LiH, 2 — оболочка из тантала, 3 — замороженный слой DT-топлива, 4 — полость, 5 — золото, 6 — DT-топливо.

радиусом 100—200 мкм со стенками толщиной 2—3 мкм. Как это ни удивительно, такой шарик можно заполнить дейтерием при давлении в несколько десятков атмосфер, и он это давление выдерживает (рис. 9.4, а).

К изумлению физиков, для технологов эта задача оказалась не слишком трудной. Довольно быстро за 1—2 года во многих странах, в том числе в СССР и в США, была разработана технология изготовления шариков для лазерных мишеней, удовлетворяющая самым строгим требованиям. Причем технология оказалась не слишком сложной и недорогой.

Компоненты стекла растворяют в воде, и капли водного раствора падают с высоты 1—2 м внутри вертикальной печи. Пролетая через область с температурой около 1000° С, компоненты стекла плавятся, и образуется стекло. Вода при этом испаряется, и образующийся пар выдувает

из стекла шарики. Шарики получают диаметром от 20 до 800 мкм с толщиной стенки в несколько микрометров и, что самое главное, с неоднородностью поверхности, измеряемой лишь сотыми долями микрометра. Остается лишь отобрать шарики нужного диаметра. Их оказывается около 10%.

Как же их заполнить термоядерным топливом? Оказывается, и это несложно. Стекланные шарики просто нагревают в атмосфере DT-смеси (дейтерий-тритиевая смесь) при нужном давлении. При высокой температуре изотопы водорода за счет диффузии легко проникают сквозь тонкую стеклнную оболочку и заполняют внутреннюю полость шарика. После охлаждения скорость диффузии сквозь стекло резко уменьшается и газ уже не может выбраться из шарика обратно.

В случае необходимости водород внутри стеклнной сферы можно заморозить. Причем последовательным охлаждением и оттаиванием можно добиться, чтобы DT-смесь наморозилась на поверхность сферы изнутри однородным слоем толщиной 2—3 мкм.

Многочисленные эксперименты с мишенями в виде стеклнного шарика были выполнены при энергии лазерного импульса в несколько сот джоулей и длительности 0,1 нс. В этих опытах было зарегистрировано образование до 10^{10} нейтронов. Произведение nt достигло 10^{18} с/м³.

Дальнейшее усовершенствование мишени заключалось в том, чтобы увеличить толщину оболочки, не слишком увеличивая при этом ее массу. Тогда при испарении легкой внешней оболочки разовьется реактивная сила, которая будет сжимать внутреннюю стеклнную оболочку и DT-газ. Если толщина внешней оболочки будет достаточно велика, чтобы стекло осталось неспаренным до конца лазерного импульса, оно защитит DT-газ от быстрых электронов и рентгеновских лучей. Для устранения ударных волн необходимо программировать во времени форму лазерного импульса. Большая толщина оболочки позволяет увеличить длительность лазерного импульса и тем облегчает эту задачу. В качестве материала для внешней оболочки использовали достаточно легкие вещества — фторопласт-4, полиэтилен или бериллий. Такая мишень рассчитана на режим сжатия, который получил название «холодный поршень». В отличие от предыдущей модели стеклнная оболочка в этой мишени должна все время оставаться сравнительно холодной. Она используется в качестве поршня, сжимающего газ (рис. 9.4, б).

Опыты с этими мишенями позволили продвинуться существенно дальше как по степени сжатия, так и по температуре. Было достигнуто сжатие DT-смеси до плотности, в 50 раз превышающей плотность жидкого водорода. Температура в момент максимального сжатия достигла возжеленных 100 миллионов градусов. Производство

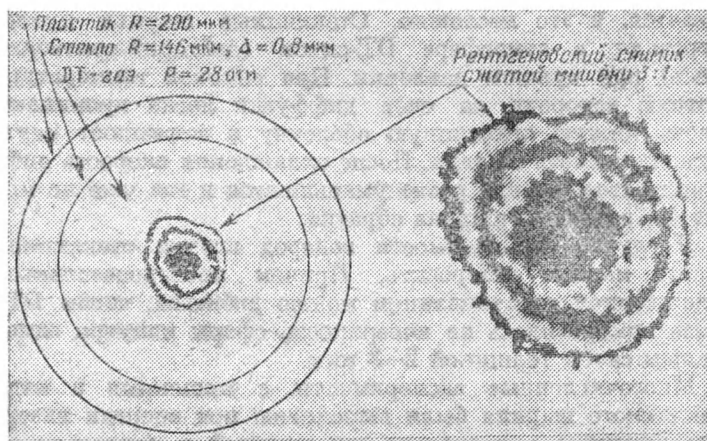


Рис. 9.5. Сжатие лазерным импульсом мишени в эксперименте типа «холодный поршень».

$\rho_t = 2 \cdot 10^{18}$ с/м³. Выделяющаяся в термоядерных реакциях энергия уже составила 1% вложенной.

Результат такого опыта в режиме типа «холодный поршень» показан на рис. 9.5. Тонкими линиями показан разрез первоначальной сферической мишени. Это был стеклянный шарик радиусом 146 мкм с толщиной стенки 0,8 мкм. Снаружи шарик был покрыт слоем полимера до диаметра 200 мкм. Сфера была наполнена DT-смесью при давлении 28 атм. В центре сферы воспроизведена фотография, полученная в момент максимального сжатия мишени в рентгеновских лучах. В качестве объектива использовалась просто маленькая дырочка в свинцовом экране. Рентгеновские лучи, пройдя через эту дырочку, дают на пленке изображение их источника. Такая техника применялась и в обычной фотографии много-много лет назад.

Справа то же изображение показано в увеличенном масштабе. Видно, что сжатие в этом опыте проходило

довольно симметрично. Объем, занимаемый DT-газом, в этом опыте был уменьшен в 250 раз.

Чтобы получилось столь симметричное сжатие, поверхность мишени не должна была отличаться от идеальной сферы в любой точке более чем на 0,3 мкм. Эти требования современная технология изготовления мишеней позволяет выполнить. Вдохновленные такими достижениями технологов, ученые пошли еще дальше по пути усложнения мишеней.

Чтобы добиться еще большего сжатия, мишени следующего поколения будут состоять уже из многих слоев. Снаружи, как и сейчас, довольно толстый слой из бериллия, затем слой полимера с крупинками тантала, затем пространство, заполненное рыхлым пенопластом или газом при небольшом давлении, и наконец самая внутренняя оболочка из золота (рис. 9.4, в).

В этой конструкции предусмотрено все, что можно предусмотреть на современном уровне понимания процессов, происходящих при облучении мишеней светом лазера. Две внешние оболочки работают в режиме «холодного поршня» и развивают большое давление для сжатия. Слой рыхлого пенопласта или газа предназначен для защиты от быстрых электронов. Внутренняя оболочка из золота служит для защиты топлива от прогрева рентгеновскими лучами. Масса внешних оболочек значительно превышает массу внутренней золотой оболочки. За счет этого достигается почти двукратное увеличение скорости сжатия DT-смеси.

Эксперименты с такими мишенями еще только планируются. Пока проведены довольно подробные расчеты. Из этих расчетов следует, что при энергии лазерного импульса в 15 кДж в такой мишени можно достичь сжатия DT-смеси до плотности в 500—1000 раз большей плотности жидкого водорода. При этом в термоядерных реакциях будет выделено уже около 0,1 вложенной энергии. А при энергии лазерного импульса в 200 кДж будет получен 10-кратный выигрыш энергии. Но для экономически выгодного производства энергии этого будет недостаточно. Учитывая довольно низкий к.п.д. лазера, для успешной работы реактора нужно добиться усиления по энергии примерно в 1000 раз.

Чтобы этого добиться, конструкцию мишени придется еще более усложнить. Во всех предыдущих мишенях решались одновременно две задачи — сжатие топлива и его нагрев до температуры зажигания. А чтобы сэкономить

энергию, необходимо эти процессы разделить. Ведь нам нужно только поджечь реакцию. В достаточно сжатом топливе дальше горение пойдет само собой, поэтому сжимать нужно все топливо, а нагревать до температуры поджига только небольшую часть. Этого можно добиться с помощью мишени такой конструкции, как на рис. 9.4, г.

Она в общем похожа на последнюю из рассмотренных выше мишеней — те же слои бериллия, полимера с танталом, газа, золота, только топливо в ней разделено на две части. Большая его часть содержится в слое, замороженном на внутреннюю поверхность второго слоя, а меньшая часть помещается по-прежнему внутри последней золотой оболочки. В такой мишени основная часть топлива подвергается холодному сжатию, а до температуры зажигания нагревается только часть, находящаяся внутри золотой оболочки.

Расчеты показывают, что с помощью лазерного импульса с энергией один миллион джоулей (1 МДж) в такой мишени можно получить выигрыш в энергии до 1000 раз. И, значит, такая система уже может работать как реактор.

Лазеры для УТС

Мишень, даже и очень сложная, — это все-таки полдела или даже меньше. Основная сложность и основная стоимость термоядерного реактора связана с сооружением подходящего лазера. В процессе изучения лазерного УТС требования к лазеру постепенно прояснились, и сейчас уже можно сформулировать основные черты этого лазера: выходная энергия лазера, несмотря на все усовершенствования мишени, должна лежать все-таки в диапазоне от 1 до 10 МДж; длительность импульса 5–10 нс; длина волны излучения 0,2–0,6 мкм; частота повторения импульсов 1–10 импульсов в секунду; к.п.д. 10%.

А вот для сравнения характеристики двух самых совершенных на сегодня лазерных систем: лазер на стекле с неодимом имеет выходную энергию до 20 кДж; длительность импульса 1–2 нс; длина волны 1,06 мкм; частота повторения импульсов 1 импульс в час; к.п.д. 0,1%. Лазер на углекислом газе (CO_2): выходная энергия 10 кДж; длительность импульса 1 нс; длина волны 10,6 мкм; частота повторения импульсов 1 импульс в 20 минут; к.п.д. 2–5%.

Из сопоставления этих параметров видно, что пока еще ни по одному из них ни неодимовый, ни углекислотный лазеры для термоядерного реактора не годятся. Часть из этих параметров может быть существенно улучшена в ходе дальнейшего развития и доведена до нужного уровня. Для неодимового лазера — это выходная энергия, длительность импульса и длина волны. Для CO_2 -лазера — это выходная энергия, длительность импульса и к.п.д.

Однако часть параметров в обоих случаях, очевидно, до реакторных требований довести не удастся. Для неодимового лазера — это частота повторения импульсов и к.п.д. Для CO_2 -лазера — это длина волны излучения. Поэтому для реактора должны быть изобретены новые лазеры. Пока что ведутся поисковые работы в этой области, и уже найдены первые кандидаты — это лазеры на кислороде, сере и селене. На этих элементах можно получить генерацию на длинах волн в несколько сотен нанометров с очень высоким к.п.д. — до нескольких десятков процентов. Однако разработка этих лазеров только еще начинается. Пока же основные усилия сосредоточены на развитии существующих лазерных систем.

Наиболее мощные современные лазеры на стекле с неодимом — это громадные установки, занимающие, как правило, целый дом. Каждый капал представляет собой сложную систему из многих десятков узлов, а число каналов исчисляется многими десятками, а то и сотнями. Например, советский лазер «Дельфин» состоит из 12 каналов, в каждом из которых работает в параллель по 18 выходных каналов, т. е. фактически 216 пучков. В американском лазере «Шива» 20 каналов, а в его перспективном варианте «Шива-Нова» число каналов будет доведено до 50. Причем оптическая система лазера — это то же самое, что надводная часть айсберга. Под водой, а в случае лазера — в подвалах, скрывается гораздо большая его часть — это система питания и охлаждения. А в случае CO_2 -лазера — еще и газовое хозяйство. Система питания, например, лазера «Шива-Нова» имеет конденсаторную батарею из 50 тысяч конденсаторов на 20 кВ каждый. В этой батарее запасается 250 МДж энергии, чтобы питать 17 тысяч ламп накачки лазера.

Надо заметить, что из-за низкого к.п.д. лазера система электрического питания современных лазеров уже превосходит по мощности и энергии системы питания самых больших токамаков. Поэтому вопрос о повышении к.п.д. лазера имеет первостепенное значение.

Второй чрезвычайно сложный вопрос — это настройка и юстировка оптической системы лазера. Для работы лазера, как известно, весьма важна очень точная настройка оптического резонатора. Только при этом условии можно добиться аккуратной работы лазера в нужном режиме. Когда речь идет о настройке одного лазера, вопрос этот достаточно отработан и не вызывает затруднений. Но когда требуется настраивать одновременно десятки каналов, в каждом из которых десятки элементов, — это уже тысячи настраиваемых узлов, и количество переходит в качество. При ручной настройке работа лазера становится практически невозможной. Пока настройщик доберется до последних каскадов, настройка первых каскадов по тем или иным причинам успеет испортиться.

Решение этой проблемы возможно только путем автоматизации настройки. И действительно, самые крупные современные лазеры имеют автоматическую настройку на базе быстродействующей ЭВМ.

Лазерный реактор

Но допустим, все проблемы с лазером, мишенью, сжатием и поджигом реакции удалось решить. Как будет выглядеть и как будет работать лазерный термоядерный реактор?

Самая главная отличительная черта реактора, работающего на инерционном удержании, — это импульсный режим работы. Из предыдущего изложения мы выяснили, что энергия лазерного импульса, необходимая для поджига реакции, получается около одного миллиона джоулей. С учетом к.п.д. лазера, а также системы преобразования тепловой энергии в электрическую, чтобы реактор мог работать с положительным выходом, коэффициент усиления по энергии должен быть около 1000. Значит, после каждого выстрела лазера в мишень будет выделяться 1000 МДж энергии. Это довольно солидный взрыв. При взрыве 1 кг тротила выделяется 4 МДж энергии, стало быть, тротиловый эквивалент этого термоядерного взрыва будет 250 кг. Это хорошая фугаска! И вот такая фугаска должна взрываться в камере реактора каждую секунду, а то и чаще.

Но в первую очередь, конечно, нужно подумать, как сделать камеру так, чтобы она выдерживала взрыв такой

фугаски. По-видимому, это должен быть стальной шар довольно большого объема. Воздух из шара должен быть выкачан. Мишень со всеми своими оболочками имеет массу около 0,01 г. Так что при взрыве выделяется много энергии, но она вложена в довольно мизерное количество вещества. Стенки реактора должны быть достаточно прочными, чтобы выдержать бомбардировку α -частицами, нейтронами и обломками мишеней.

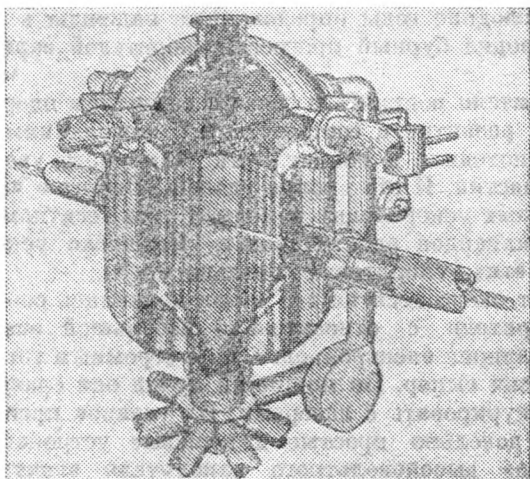


Рис. 9.6. Проект лазерного термоядерного реактора.

Схема одного из таких реакторов показана на рис. 9.6. Мишень сбрасывается в камеру реактора сверху и свободно падает вниз. В момент пролета через центр камеры она расстреливается лазерными пучками. Выделившаяся энергия воспринимается первой стенкой, переходит в тепло, которое через теплообменник передается в паровой котел, а затем преобразуется в электроэнергию, как на обычной электростанции.

Этот вариант реактора рассчитан на несколько более мягкий режим, чем тот, с которого мы начали. Здесь предполагается, что в мишени будет выделяться только 100 МДж энергии (тротиловый эквивалент 25 кг), но зато это будет происходить 10 раз в секунду. Можно, наверное, и так. Если удастся создать соответствующий лазер.

Другие способы

Создание лазера с выходной энергией более миллиона джоулей с нужной длиной волны, длительностью импульса, к.п.д. и частотой повторения представляет собой задачу, может быть, и разрешимую, но, во всяком случае, чрезвычайно дорогую. Естественно поэтому поискать какие-то другие методы для нагрева плазмы при инерционном удержании.

За последние годы определенные надежды в этой области породил бурный прогресс ускорителей заряженных частиц.

Ускорители родились в связи с развитием ядерной физики. Их развитие в соответствии с пожеланиями заказчика происходило в направлении всемерного увеличения энергии частиц. И это вполне удалось. Энергию частиц на современных ускорителях измеряют уже десятками и сотнями миллиардов электронвольт. Но число ускоряемых частиц в этих ускорителях довольно мало.

Но вот около десятка лет назад появились совсем другие ускорители с относительно небольшой энергией — около миллиона электронвольт, но с огромным током в десятки тысяч ампер. По мощности пучка они сразу же начали конкурировать с лазерами. Их главное преимущество — это довольно простые и дешевые устройства. Они состоят из высоковольтного накопителя электрической энергии и диода — двух металлических электродов в вакууме. Когда к этим двум электродам внезапно прикладывается напряжение в миллион вольт, электрический ток возникает сам собой — сильное электрическое поле вырывает электроны из металла и образуется пучок электронов, ускоренных до энергии в миллион электронвольт. Эти электроны летят со скоростью очень близкой к скорости света и для них все эффекты, открытые Эйнштейном в теории относительности, выступают не в виде небольших поправок, а определяют самое существо движения. Их масса, например, превышает массу покоя в 3 раза.

Теория относительности называется релятивистской теорией. Поэтому такие пучки электронов называют еще релятивистскими пучками.

Релятивистские электронные пучки можно использовать для нагрева вещества до температуры термоядерной реакции при инерционном удержании не хуже, чем пучки лазера. В отличие от лазерного света электроны не задерживаются плазмой, образующейся на поверхности мише-

ни, а проникают прямо в мишень, поэтому часть проблем, стоящих на пути лазерных УТС, для электронных пучков снимается. Но большая глубина проникновения электронов мешает сжатию мишени, поэтому энергия электронного пучка, необходимая для поджига реакции, получается

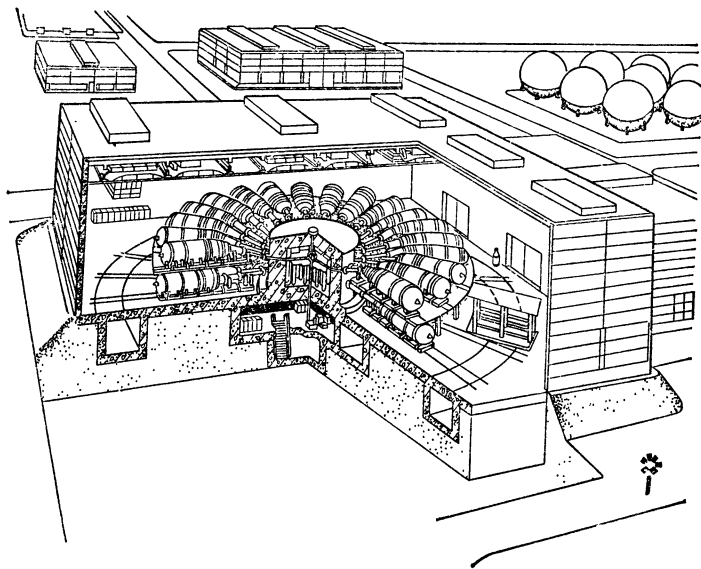


Рис. 9.7. Проект установки «Ангара-5».

значительно больше, чем для лазерного импульса, что-то около 10–20 МДж. Зато получить эти миллионы джоулей значительно легче, чем в случае лазерного луча.

Облучение мишени электронными пучками предполагается использовать в экспериментах на установке «Ангара-5», сооружение которой заканчивается в настоящее время.

Установка «Ангара-5» представляет собой грандиозное сооружение (рис. 9.7). По полному проекту она будет состоять из 48 модулей. Каждый модуль представляет собой ускоритель, создающий пучок электронов с энергией 2 МэВ и током 0,8 МА. Длительность пучка 90 нс, а энергия, которую несет такой импульс, 100 кДж. Таким образом, 48 модулей смогут вложить в мишень около 5 МДж за 30 нс. При такой энергии можно рассчитывать получить

степень сжатия вещества и температуру в мишени, достаточные для поджига термоядерной реакции.

Конструкция мишени для получения термоядерной энергии с помощью релятивистских пучков электронов аналогична конструкции мишеней для лазерного термоядерного синтеза. Небольшие различия связаны с большей проникающей способностью быстрых электронов по сравнению с светом лазера. Из-за этого в мишенях для электронных пучков внешние оболочки мишени делаются более толстыми. В них используются тяжелые металлы — золото, вольфрам.

В проектах реакторов на основе релятивистских электронных пучков обычно предполагается вклад энергии 10–30 МДж. К.п.д. преобразования электроэнергии в энергию электронного пучка в современных ускорителях около 0,4. Но эффективность использования энергии электронного пучка для нагрева мишени получается из-за больших потерь довольно низкой — порядка 0,1. Поэтому, учитывая еще к.п.д. преобразования тепловой энергии в электрическую, получается, что для реактора на электронных пучках, так же как и для лазерного реактора, положительный баланс энергии можно получить только при очень большом выигрыше в энергии в самой мишени: порядка 100 или 1000. Такой выигрыш в энергии получить можно, если использовать сложную мишень, в которой энергия пучка используется для поджига лишь небольшой части термоядерного топлива, а затем происходит сгорание гораздо большей его части за счет энергии, выделяющейся уже в ходе самих термоядерных реакций.

Таким образом, при работе термоядерного реактора на основе электронных пучков в мишень будет вкладываться $\sim 10^7$ Дж, а выделяться 10^9 – 10^{10} Дж — это энергия довольно солидного взрыва (10^{10} Дж имеют тротилловый эквивалент 2,5 т). По расчетам, выдержать взрыв такой силы может стальная сфера диаметром 20–30 м и массой около 1000 т. Такие взрывы можно повторять каждые 10 с, так что тепловая мощность такого реактора будет около 10^9 Вт.

Несколько облегчить ситуацию обещает переход на пучки тяжелых ионов. В тех же самых ускорителях, лишь переменив полярность, можно ускорять вместо электронов ионы кислорода, аргона или еще более тяжелых элементов. Пробег таких ионов в веществе значительно меньше, чем для электронов. Поэтому с ними можно получить большую степень сжатия мишени и, значит, уменьшить

энергию для поджига реакции. Соответственно уменьшается и энергия, выделявшаяся при взрыве мишени. Однако опыты по использованию ускоренных ионов для термоядерного синтеза только еще начинаются.

Смотрим опять на карту поля боя

Развитие исследований по лазерному направлению происходит очень быстро. За какие-то 10—12 лет лазерный термояд преодолел тот же путь, на который

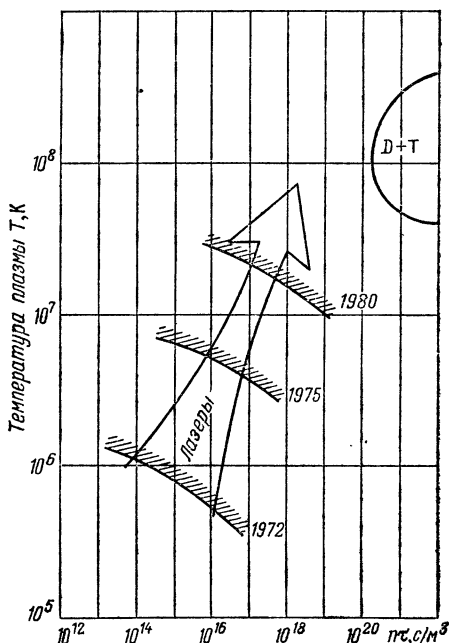


Рис. 9.8. Так выглядит наступление лазеров на карту поля боя.

классическим направлениям, основанным на идее магнитного удержания, понадобилось 30 лет (рис. 9.8).

Поэтому, несмотря на сложность проблем, которые еще ждут своего решения, исследования по лазерному направлению продолжают развиваться.

ГЛАВА X

МЮ-МЕЗОННЫЙ КАТАЛИЗ

В самом начале работ над термоядерной проблемой возникла изящная идея, которая, казалось бы, позволяла обойтись без высоких температур.

Высокие температуры в ядерном синтезе нужны для того, чтобы заставить ядра дейтерия и трития сблизиться на расстояние $\sim 10^{-14}$ м, несмотря на электрическое отталкивание. Отталкивание возникает от того, что оба ядра заряжены положительно. Вот если бы можно было как-нибудь избавиться от заряда, то и высокая температура была бы не нужна.

Именно так обстоит дело в ядерных реакциях деления. Деление ядра урана в атомном реакторе происходит при поглощении нейтрона. Нейтрон не имеет заряда и свободно подходит как угодно близко к атомному ядру. При этом медленные нейтроны оказываются даже эффективнее, чем быстрые, — захват нейтронов ядерными силами, в результате которого происходит деление ядра, в случае медленных нейтронов происходит с большей вероятностью, чем в случае быстрых.

Как избавиться от заряда ядра, мы пока не знаем. Но заряд можно скомпенсировать. Для этого нужно рядом с положительно заряженным ядром расположить отрицательно заряженную частицу, тогда система в целом будет электрически нейтральна. Общеизвестный пример такой системы — обыкновенный атом водорода. В нем положительный заряд ядра скомпенсирован отрицательным зарядом электрона.

Жаль только, что эта система для наших целей не годится. Электрон в атоме водорода находится на расстоянии $5 \cdot 10^{-11}$ м от ядра, тогда минимальное расстояние между ядрами при столкновении двух таких нейтральных систем получается около 10^{-10} м, что в тысячи раз превышает радиус действия ядерных сил. Поэтому при столкновении атомов дейтерия и трития между собой реакции ядерного синтеза не происходят.

Вот если бы как-то уменьшить размеры атома, сделав их сравнимыми с радиусом действия ядерных сил, тогда реакции ядерного синтеза могли бы происходить при столкновении таких атомов и при низкой температуре.

Оказывается, такой атом создать можно! Для этого вместо электрона можно использовать отрицательно заряженный мю-мезон.

Мю-мезон — неустойчивая частица, рождающаяся при ядерных реакциях. Мезоны имеют массу промежуточную между массой электрона и ядра. Поэтому они так и называются «мезон» — по-латыни значит «средний». Мю-мезон имеет массу в 207 электронных масс. Из отрицательно заряженного мю-мезона и положительно заряженного ядра можно образовать атом. Такой атом называют мезоатомом.

В соответствии с законами атомной физики радиус атома обратно пропорционален массе более легкой частицы, поэтому радиус мезоатома примерно в 200 раз меньше радиуса атома водорода. В то же время мезоатом электрически нейтрален, так же как и обычный атом. И, значит, два таких мезоатома могут подойти друг к другу на расстоянии порядка 10^{-13} м, а это уже сравнимо с радиусом действия ядерных сил. Ага! Значит, с помощью мезоатомов можно осуществлять реакции ядерного синтеза и без всякой высокой температуры!

Это действительно так. Более того, исторически случилось даже наоборот — сначала обнаружили реакции ядерного синтеза, стимулированные мю-мезонами, экспериментально, и только потом, когда разобрались в механизме этого явления, возникла идея, а нельзя ли использовать их для решения проблемы УТС?

А было это так. В одном из первых экспериментов, в которых изучались мю-мезоны, обнаружили странные случаи. В жидководородной пузырьковой камере после торможения и остановки мю-мезона иногда наблюдается появление нового мю-мезона со стандартной энергией 5,4 МэВ.

Именно такая энергия выделяется в реакции ядерного синтеза $p + D \rightarrow {}^3\text{He}$. Механизм стимулирования этой реакции мю-мезоном оказался таким: мю-мезон (μ) останавливается вблизи ядра водорода — протона (p) и образует с ним мезоатом μp . Затем мезоатом встречается с атомом дейтерия (D), который всегда присутствует в жидком водороде в виде примеси. В результате образуется мезомолекула $\mu p D$. Отрицательно заряженный мезон, расположившись между положительно заряженными ядрами водорода и дейтерия, сближает их до расстояния $\approx 10^{-13}$ м, и тогда под действием ядерных сил происходит реакция синтеза ядра ${}^3\text{He}$. При этом мезон освобождается и может участвовать в новых реакциях. Таким образом, мю-мезон действует в данном случае как катализатор — стимулирует реакции, а сам в них не расходуется.

Вот тогда и родилась красивейшая идея использовать мю-мезонный катализ для создания реактора на основе реакций ядерного синтеза. Такой реактор имел бы колоссальные преимущества перед обычным термоядерным реактором — не нужны кошмарные температуры в десятки миллионов градусов, не нужны магнитные поля, не надо усмирять коварную плазму.

Естественно, как только эта идея родилась, к проверке ее приступили с большим энтузиазмом. Основная трудность в осуществлении этой идеи связана с тем, что мю-мезон не стабильная частица. Через две миллионные доли секунды после рождения мю-мезон распадается на электрон и два нейтрино. Поэтому возможность осуществления мю-мезонного реактора зависит от того, сколько реакций успеет он простимулировать за свою столь краткую жизнь.

В самом начале 60-х годов были проведены измерения скорости образования мезомолекул $D\mu D$ в пузырьковой камере, наполненной жидким дейтерием. Оказалось, что за время жизни мю-мезона в среднем происходит $1/6$ реакции ядерного синтеза $D+D$. Это значит, что только один из шести мю-мезонов успевает произвести реакцию, а остальные распадаются без всякой пользы. Но может быть этого достаточно? Ведь в результате этой единственной реакции выделяется огромная энергия — 4 МэВ. Эту энергию надо сравнить с энергией, затраченной на создание шести мю-мезонов.

Минимальную энергию, необходимую для рождения в ядерных реакциях любой частицы, можно подсчитать по знаменитой формуле Эйнштейна $E=mc^2$, связывающей энергию с массой частицы и скоростью света. Для создания электрона, согласно этой формуле, требуется 0,5 МэВ энергии. Мю-мезон в 207 раз массивнее. Значит, для создания одного мю-мезона требуется около 100 МэВ. Причем это теоретически минимальная энергия. Практически затраты энергии на создание мю-мезона, естественно, в несколько раз больше. Но пока нас интересует принципиальная сторона. Итак, израсходовав на создание шести мю-мезонов около 600 МэВ энергии, мы можем с их помощью произвести одну реакцию ядерного синтеза, в которой выделится около 4 МэВ энергии.

Да... занятие явно не выгодное.

Этот результат исключал мезонный катализ из числа направлений, перспективных с точки зрения термоядерной проблемы. Основные усилия по решению этой пробле-

мы сосредоточились на главном направлении — магнитная изоляция и нагрев до температуры в десятки миллионов градусов. Вот таким образом в начале 60-х годов погибла эта замечательная идея.

Упорство одиночек или польза академической науки

Только несколько исследователей в разных странах продолжали интересоваться реакциями, стимулированными мю-мезонами.

Теоретики выяснили, что мю-мезоны катализируют ядерные реакции в три этапа. Сначала образуется комплекс из обычной молекулы дейтерия D и мезоатома μD , затем — мезомолекула $D\mu D$, состоящая из двух ядер дейтерия, мю-мезона и электрона, а затем уже происходит сближение ядер и реакция синтеза. Причем скорость всего процесса определяется образованием мезомолекулы $D\mu D$. Если уж образовалась мезомолекула, то реакция синтеза произойдет наверняка.

Учитывая это, экспериментаторы принялись изучать процесс образования мезомолекул. Ашмор в Англии и Додд в США поставили несколько опытов, в которых измерялась вероятность возникновения мезомолекул из ядер водорода и дейтерия. Результаты вполне укладывались в предсказания теории. Постепенно копились экспериментальные данные, повышалась точность теоретических расчетов. Словом, все шло так, как и должно идти в спокойных, хорошо отработанных областях академической науки. И вдруг случилась странная вещь: хорошо отработанный эксперимент разошелся с теорией.

В 1966 г. в Дубне, в Объединенном институте ядерных исследований, под руководством В. П. Джелепова ставили опыт по образованию мезомолекул в дейтерии. В этой работе вместо жидководородной пузырьковой камеры для регистрации ядерных реакций была использована диффузионная камера, работавшая при комнатной температуре. Результаты оказались неожиданными — реакции ядерного синтеза происходили в 10 раз чаще, чем в экспериментах с пузырьковой камерой.

В чем же дело? Поначалу показалось, что в методику работы вкралась какая-то ошибка. Проверили. Оказалось, что ошибки нет. И дубнинский опыт, и работы Ашмора и Додда были выполнены очень тщательно. Было высказано подозрение, показавшееся сначала совершенно

невероятным: а может быть, дело именно в том, что эксперименты проводились при разной температуре?

Чтобы исключить всякие сомнения, в 1977 г. в Дубне был поставлен прямой эксперимент: мю-мезонами облу-

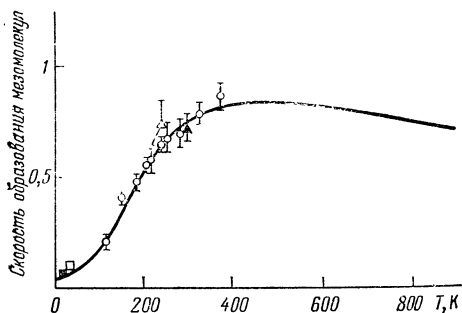


Рис. 10.1. Зависимость скорости образования мезомолекул $D\mu D$ от температуры: — теоретическая кривая; ■, □, ○, △ — данные различных экспериментов.

чали сосуд с газообразным дейтерием, температура которого последовательно изменялась от -200 до $+100^\circ\text{C}$. Сомнений не осталось: вероятность образования мезомолекул дейтерия и соответственно выход ядерных реакций плавно возрастали с увеличением температуры и при $+100^\circ\text{C}$ превысили значения, зафиксированные при температуре -200°C , примерно в 10 раз (рис. 10.1).

Так значит, дело действительно только в температуре?

Не может этого быть!

Скептическую реакцию физиков-ядерщиков легко понять. В ядерной физике особый масштаб энергий. Пороги реакций, уровни возбуждения ядер характеризуются миллионами электронвольт. Эквивалентная этим энергиям температура составляет миллиарды градусов. И чтобы повлиять на эти процессы, нужна измеримая энергия.

На заре атомной физики, когда был открыт первый из ядерных процессов — радиоактивный распад, много раз пытались повлиять на скорость радиоактивного процесса с помощью внешних условий: нагревали радиоактивные соли до тысяч градусов, помещали их в сильные электрические и магнитные поля. С высоты сегодняшних знаний такие попытки кажутся ужасно наивными — все эти воздействия ничтожно слабы по сравнению с масштабом

ядерных энергий. Поэтому первоначально мысль о том, что перепад температуры всего в 200—300 градусов как-то влияет на скорость ядерной реакции, была встречена, мягко говоря, без большого энтузиазма. Однако советский физик Э. А. Весман еще в 1967 г. показал, что такая чувствительность ядерного процесса к температуре возможна. Могло это быть в том случае, если мезомолекула имеет резонансный уровень с поразительно малой энергией, соизмеримой с тепловой энергией молекул при той температуре, при которой ставился дубненский эксперимент.

И такое бывает...

Мне кажется, нет нужды в который раз объяснять нынешнему высокообразованному читателю, что такое резонанс. Примеры с качелями и мостом, разрушающимся под ногами у солдат, идущих по мосту в ногу, достаточно набили оскомину. Единственное, что важно для нас сейчас, это то, что при резонансе колебаний вероятность образования мезомолекулы возрастает во много тысяч раз.

Но чтобы наступил резонанс, необходимы сразу несколько совпадений — частота колебаний комплекса, состоящего из обычной молекулы D_2 и мезоатома μD , должна совпадать с частотой колебаний образующейся из них молекулы $D\mu D$. А энергия всех этих колебаний должна быть достаточно мала. Чтобы проверить существование резонансного уровня со столь малой энергией, группа теоретиков из Дубны под руководством Л. И. Пономарева рассчитала процесс образования мезомолекул дейтерия с очень высокой точностью.

В прежних, довольно грубых расчетах были обнаружены уровни колебаний мезомолекул дейтерия с энергией, соответствующей температуре в несколько миллионов градусов. Для возбуждения этих уровней температура в сотни градусов была явно слишком мала и никакого резонансного возрастания вероятности реакций с ее помощью не получалось. Надо было отыскать уровень с энергией, в 1000 раз меньшей. Для этого весь расчет нужно было выполнить с точностью в 1000 раз большей, а такой точности расчетов в квантовой механике удастся добиться не часто.

Теоретики из Дубны блестяще справились с этой сложной задачей. Им удалось показать, что искомый резонансный уровень со всеми нужными совпадениями в мезомо-

лекулах $D\mu D$ и $D\mu T$ действительно существует! Расчет скорости образования мезомолекул дейтерия $D\mu D$ с учетом этого уровня дал зависимость от температуры, прекрасно совпадающую с экспериментом. А для мезомолекулы дейтерий — тритий ($D\mu T$) был получен вообще феноменальный результат: в смеси $D+T$ мезон за время своей жизни успевает образовать около 100 молекул $D\mu T$ и, следовательно, вызвать 100 термоядерных реакций!

Этот результат расчета совершенно меняет ситуацию с мезонным катализом термоядерного синтеза. Ведь в ста реакциях $D+T$ выделится около 2000 МэВ энергии, в то время как на создание самого мезона нужно затратить всего лишь около 100 МэВ. Так что мезонный катализ вновь становится одним из самых перспективных направлений в реакциях ядерного синтеза.

Изменяющаяся ситуация, естественно, привлекла внимание экспериментаторов. Группой советских ученых в Объединенном институте ядерных исследований в Дубне немедленно был поставлен эксперимент по измерению скорости мю-мезонного катализа $D+T$. Эксперимент был поставлен на пучке мю-мезонов Дубненского синхротрона. Мю-мезоны имели энергию 130 МэВ. В качестве мишени использовалась газообразная смесь дейтерия и трития. Для регистрации реакций синтеза $D+T$, катализируемых мю-мезонами, использовался метод задержанных совпадений. Перед влетом в мишень мю-мезон вызывал вспышку в пластмассовом сцинтилляторе. Эта вспышка фиксировалась фотоумножителем. Затем счетчики нейтронов регистрировали рождение нейтрона с энергией 14,1 МэВ. И, наконец, счетчики быстрых электронов фиксировали рождение быстрого электрона при распаде мю-мезона. И только в том случае, если все эти события происходили в должной последовательности, электронная вычислительная машина регистрировала факт мюонного катализа реакции синтеза $D+T$. Такая схема надежно защищала от ошибок при подсчете количества реакций. При захвате мю-мезона другими ядрами, например при пролете его через металлические стенки камеры, появляется пейтрон, но отсутствует электрон. При простом распаде мю-мезона появляется электрон, но нет нейтрона. В обоих случаях отсчет бракуется и не засчитывается.

Тщательно проведенные измерения подтвердили предсказания теории. Скорость образования мезомолекул $D\mu T$ и, соответственно, скорость катализа реакций синтеза превышает скорость распада мю-мезона более чем в 100 раз.

Карманный реактор

Метод мезонного катализа имеет ряд несомненных преимуществ перед «классическим термоядом» — не нужны температуры в десятки миллионов градусов, не нужны хитроумные магнитные поля. Но это еще не все. Мезонный реактор представляет собой просто сосуд с газом — смесью дейтерия и трития, в который впрыскиваются мезоны. Размер сосуда зависит от давления газа. Нужно, чтобы пробег мю-мезонов был меньше размеров сосуда. При давлении в десятки атмосфер диаметр сосуда, где происходят реакции, составит около 10 см. Правда, для использования энергии α -частиц и нейтронов, образующихся в результате реакции синтеза, этот сосуд нужно окружить толстым слоем поглотителя, в состав которого для воспроизводства трития должен входить литий. Кроме того, понадобятся теплообменники, генераторы и прочее стандартное оборудование электростанций. А оно имеет внушительные размеры. Так что карманный реактор и с мю-мезонами, пожалуй, не получится.

Но все-таки в некотором смысле реактор на мю-мезонах можно назвать карманным. Дело в том, что мю-мезонный реактор можно сделать и небольшой мощности, а это существенное преимущество. Ведь одна из трудностей, стоящих на пути «классического» термоядерного реактора с магнитным удержанием, это очень большая величина мощности. Минимальная мощность «классического» термоядерного реактора, при которой он становится энергетически выгодным, в 5—10 раз превышает мощность самых больших из электростанций, существующих сегодня.

Но что-то мы уж больно размечтались: ведь не решен самый главный вопрос.

А почему нынче мю-мезоны?

Минимальная энергия около 100 МэВ, необходимая для получения мю-мезона, о которой мы упоминали выше, — чисто теоретический предел. Этот предел вычислили очень просто: подставили в соотношение Эйнштейна $E=mc^2$ массу мю-мезона — 207 электронных масс, и готово. Однако реальная жизнь диктует свои законы. На самом деле единственный пока известный способ получения мю-мезона — это распад пи-мезонов с массой 273 электронных масс, а он требует уже 140 МэВ. Кроме того, при энергии 140 МэВ процесс образования частиц только начинается, а заметная скорость образова-

ния пи-мезонов наблюдается только при энергии 300—500 МэВ. Такую энергию должны иметь разгоняемые в ускорителе протоны перед тем, как врезаться в бериллиевую мишень. Из нее выбивается пучок пи-мезонов, которые, быстро распадаясь, превращаются в мю-мезоны.

Вот как все сложно и невыгодно энергетически. Если еще учесть к. п. д. ускорителя, станет совсем плохо: на образование одного мю-мезона уходит около 5000 МэВ или даже больше.

На помощь приходит уран

Чтобы сделать мезонный катализ энергетически выгодным, нужно либо снизить затраты энергии на производство мезонов, либо увеличить выход термоядерной энергии на один мезон.

Первый путь связан с усовершенствованием технологии производства мезонов. По-видимому, какие-то резервы на этом пути есть. Ведь до сих пор потребности в массовом производстве мезонов не было, и потому усовершенствованием технологии этого производства всерьез еще не занимались. Но эти резервы — дело будущего. Пока что остается второй путь. Здесь некоторые рецепты уже найдены. В проектах будущих термоядерных реакторов на основе магнитных ловушек уже давно найден и подробно разработан способ увеличения выхода энергии. Он состоит в том, чтобы использовать для дополнительной выработки энергии способность нейтронов, рождающихся в термоядерных реакциях, вступать в ядерные реакции с ядрами урана или тория.

В этих реакциях не только выделяется дополнительная энергия, но еще и рождаются новые изотопы — плутоний-239 и торий-233, которые потом можно использовать в качестве топлива для обычных атомных электростанций.

Подробно работа такого гибридного термоядерно-уранового реактора будет описана в гл. XI. Сейчас для нас важно, что гибридный реактор с учетом последующего использования вырабатываемого в нем ядерного топлива дает увеличение энергии, приходящейся на одну термоядерную реакцию примерно в 7 раз. С учетом такого эффекта выработка энергии на один мю-мезон может достигнуть 14 000 МэВ. Это уже значительно превышает те 5000 МэВ, которые нужно затратить на каждый мю-мезон при современной технологии их производства.

Таким образом, энергетически выгодный гибридный мю-мезон-урановый реактор, в принципе, можно строить хоть сейчас. Но на самом деле никто его строить сейчас не будет. Над его проектом нужно еще работать и работать. Уж слишком неизящно выглядит комбинация из синхрофазотрона и уранового реактора по сравнению с карманным реактором, который грезился при рождении этой идеи. Но, с другой стороны, замечательно, что одна из идей, отбракованных в самом начале исследований, оказалась в итоге одной из перспективных. Во всяком случае она уже привела к принципиально осуществимому варианту реактора.

ГЛАВА XI

ТЕРМОЯДЕРНЫЙ РЕАКТОР

Основные проблемы, стоящие на пути к управляемому термоядерному синтезу, намечены. Для наиболее продвинутых направлений магнитного удержания в тороидальных ловушках — токамаках и стеллараторах, в ловушках с магнитными пробками принципиальная осуществимость термоядерного реактора на их основе не вызывает сомнений.

Разумеется, речь пока идет лишь о принципах. Реальное сооружение реактора требует решения еще множества инженерных проблем. Некоторые из этих проблем чрезвычайно сложны. На их решение в большинстве прогнозов отводится одно-два десятилетия. Так что сооружение первого термоядерного реактора ожидается где-то в конце 90-х годов или в начале XXI века.

Через пропасть в три прыжка

Путь, отделяющий нас от этого момента, можно разбить на три больших этапа. Основная задача первого этапа — это достижение необходимых параметров плазмы: температуры, плотности и времени удержания. Эта задача будет, по-видимому, решена в токамаках следующего поколения, сооружение которых ведется в настоящее время во многих странах. Это «Т-15» в СССР, «ТФТР» в США, «ДжЕТ» в Западной Европе, «ДжТ-60» в Японии. Размеры и все основные характеристики этих установок уже практически равны или

немного меньше предполагаемых характеристик токамак-реактора. Их сооружение будет завершено к середине 80-х годов. А к концу этого десятилетия основная цель, ради которой строятся эти установки, должна быть достигнута.

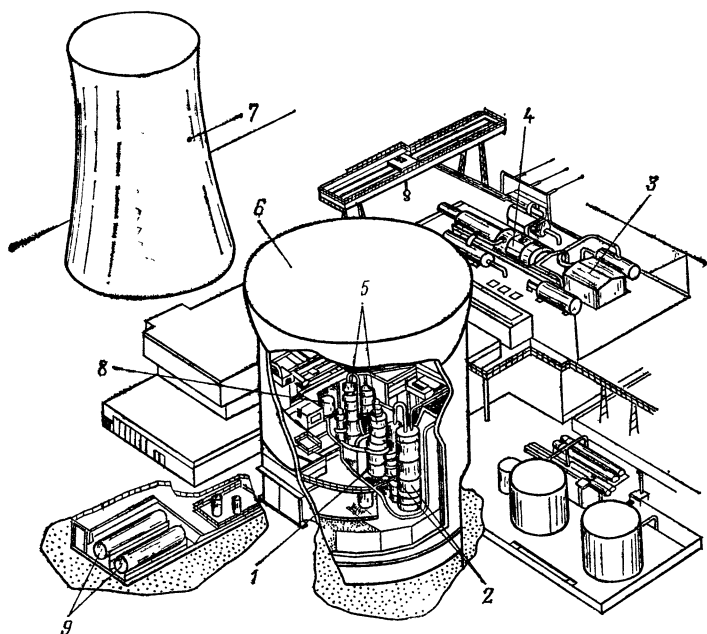


Рис. 11.1. Общий вид термоядерной электростанции будет почти такой же, как у атомной. Заменен будет только сам реактор. 1 — корпус реактора, 2 — теплообменники, 3 — генератор, 4 — турбина, 5 — циркуляционные насосы, 6 — железобетонная защитная оболочка, 7 — градирня, 8 — компенсатор давления, 9 — дренажные баки.

Второй этап — это сооружение демонстрационного реактора, в котором не только будут достигнуты необходимые параметры плазмы, но и должна быть продемонстрирована возможность инженерного решения всех технических проблем и получение положительного баланса энергии.

Это значит, что, в отличие от установок первого этапа, демонстрационный реактор должен иметь еще основные элементы полноценного реактора, а не только собственно магнитную ловушку (рис. 11.1). Он должен работать на

смеси дейтерия и трития, с тем чтобы интенсивность термоядерных реакций в плазме была такой же, как и в будущем реакторе. Это необходимо для испытания работы всех узлов установки в реальном масштабе потоков тепла и нейтронного излучения. Тогда на нем можно будет отработать технику воспроизводства трития за счет облучения лития термоядерными нейтронами, испытать стойкость материалов в условиях интенсивного нейтронного излучения, равному которому нельзя создать никакими другими способами.

Демонстрационный реактор должен уже иметь систему для отбора выделяющегося в термоядерных реакциях тепла и для передачи его во вторичный контур на переработку в электроэнергию. По сравнению с полноценным термоядерным реактором демонстрационному реактору предоставляется только одно послабление — перед ним не ставится задача выдерживать конкуренцию с другими способами производства электроэнергии по стоимости киловатт-часа.

Это задача третьего этапа. Чтобы подчеркнуть важность именно экономических проблем, реактор третьего этапа называют «коммерческим».

При сооружении «коммерческого» реактора будут использованы технические решения, найденные в результате исследований на демонстрационном реакторе. Но при этом ставится задача максимального снижения капитальных затрат на сооружение установки и стоимости эксплуатации.

Коммерческий реактор — это уже полноценная электростанция, которая должна продемонстрировать преимущества термоядерной энергетики по сравнению с другими видами ее с точки зрения экономики, экологии, радиационной безопасности и так далее. Если это удастся, то перед термоядерной энергетикой откроется дорога для самого широкого развития. Замечательный опыт международного сотрудничества, накопленный в ходе многолетней работы над проблемой УТС, особенно ярко проявляется на заключительном этапе этого долгого пути.

По мере приближения к заветной цели установки становятся все более крупными и соответственно все более дорогими. Стоимость каждой из четырех установок следующего этапа («Т-15», «ТФТР», «ДжЕТ», «ДжТ-60») — 200—300 миллионов долларов, а стоимость демонстрационного реактора оценивается в астрономическую для научно-исследовательской установки сумму — свыше миллиар-

да долларов. Строительство нескольких установок такого масштаба отдельными странами явно нецелесообразно.

Несколько лет назад был создан Международный Комитет по разработке проекта демонстрационного реактора «Интор» — интернациональный тороид. Работа над проектом «Интора» продвигается очень успешно. Эскизный проект уже практически готов. После доработки проекта в соответствии с результатами исследований, которые будут проведены на токамаках первого этапа — «Т-15», «ТФТР», «ДжЕТ», «ДжТ-60», можно будет приступать к строительству «Интора». Австрия и Финляндия уже выразили готовность предоставить место для сооружения «Интора» на своей территории.

Как устроен реактор?

Хотя сейчас еще, пожалуй, рано приступать к сооружению токамака-реактора, его принципиальная схема уже достаточно ясна. На рис. 11.2 представлена в разрезе главная часть реактора — собственно токамак. Он, естественно, имеет тороидальную форму (на рисунке показана только одна правая часть). Плазма помещается в самой глубине токамака и имеет форму вытянутого эллипса. Размеры этого эллипса будут, по видимому, $(2 \div 3) \times (3 \div 5)$ м, а объем плазмы — несколько сот кубических метров.

Термоядерная энергия получается в реакции



в виде кинетической энергии образующихся в этой реакции частиц. Причем α -частице (ядру ${}^4\text{He}$) достается только 3,5 МэВ, а остальные 14,1 МэВ приходится на долю нейтрона.

Нейтроны свободно проходят через магнитное поле ловушки, и, чтобы остановить их, плазму окружают со всех сторон толстым слоем вещества — бланкетом. В бланкете нейтроны отдают свою энергию, которая преобразуется в тепло, а в дальнейшем и в электроэнергию. А α -частица захватывается магнитным полем ловушки и в столкновениях с частицами плазмы постепенно отдает им свою энергию. За счет этой энергии и поддерживается высокая температура плазмы, необходимая для термоядерного горения. Внешние источники нагрева используются только в начале разряда для нагрева плазмы до температуры «зажигания».

Энергия, выделяющаяся в плазме, непрерывно переносится за счет теплопроводности и излучения на внутреннюю стенку blankets (2 на рис. 11.2). Эта стенка — первая стенка со стороны плазмы — работает в очень тяжелом режиме. Она непосредственно взаимодействует с плазмой, на нее обрушивается поток излучения и частиц, сквозь нее проходит поток быстрых нейтронов. Разработка конструкции первой стенки представляет одну из труднейших инженерных проблем, стоящих на пути к термоядерному реактору.

Образующиеся в ходе термоядерного горения ядра гелия после того, как они отдадут свою энергию плазме, представляют собой своего рода «золу», которую необходимо удалять из реактора. Кроме того, из-за бомбардировки первой стенки частицами плазмы и излучением из нее непрерывно выбиваются примеси, от которых плазму тоже желательно очистить. Для решения этих проблем в реакторе предусмотрен дивертор (4 на рис. 11.2).

Магнитное поле для удержания плазмы создается сверхпроводящими катушками (6). В настоящее время самым подходящим материалом для изготовления сверхпроводящих катушек считаются сплавы ниобия с титаном или оловом $NbTi$ и Nb_3Sn . Эти сплавы становятся сверхпроводящими при самой высокой из всех известных сверхпроводников температуре — 20 К. Но все равно эта температура довольно низкая ($-253^{\circ}C$) и ее поддержание требует больших затрат энергии на охлаждение. Сверхпроводящие материалы очень чувствительны к нейтронному излучению. Поэтому после blankets приходится ставить солидный слой защиты (5) толщиной 1–1,5 м. Кроме катушек, магнитная система токамака включает еще множество управляющих обмоток (7). Они предназначены для регулирования положения плазмы и стабилизации крупномасштабных неустойчивостей плазмы методом об-

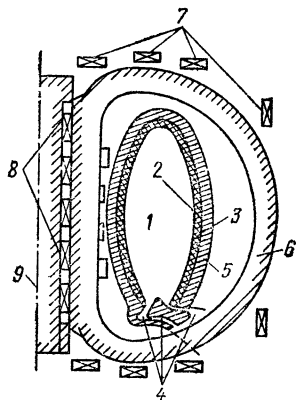


Рис. 11.2. Принципиальная схема реактора-токамака: 1 — плазма, 2 — первая стенка, 3 — blanket, 4 — диверторный объем, 5 — радиационная защита, 6 — обмотки тороидального магнитного поля, 7 — обмотки управления и дивертора, 8 — обмотки индуктора, 9 — ось тора.

ратных связей. Вблизи оси тора располагается индуктивная обмотка для возбуждения в плазме тока. Сила тока в плазме токамака-реактора исчисляется миллионами ампер. Но его вклад в нагрев плазмы невелик. Ток нужен для создания конфигурации магнитного поля, способной удерживать плазму.

Индуктивная обмотка токамака работает по тому же принципу, что и обыкновенный трансформатор. Вторичным витком служит сама плазма. Ток в плазме возбуждается при увеличении тока в индуктивной обмотке. Поэтому он не может существовать непрерывно. Ведь ток в индуктивной обмотке невозможно увеличивать до бесконечности. Поэтому реактор-токамак будет работать в импульсном режиме. В течение первых 5—10 с плазма создается и нагревается до температуры зажигания. Для нагрева используется сначала тепло, выделяемое током, текущим по плазме. А затем, когда температура достигает 10 миллионов градусов и токовый нагрев становится неэффективным, включается дополнительный источник нагрева. Это будет пучок нейтральных атомов или же мощный генератор радиоволн. С помощью дополнительного нагрева температура плазмы поднимается до 100 миллионов градусов и в плазме начинаются термоядерные реакции.

Теперь дополнительные источники нагрева можно выключить и в дальнейшем реактор работает за счет тепла, выделяющегося в самой термоядерной реакции. Эта стадия — горение — длится несколько сотен или даже тысяч секунд, т. е. минут 10—20. Затем ток выключается. Плазма уходит на первую стенку (бедная стенка; ох и тяжело ей приходится в этот момент!). В паузе образовавшийся из плазмы нейтральный газ откачивается. Камера заполняется чистой смесью $D+T$, и все начинается сначала.

Проблемы, проблемы...

Принципиальная схема токамака-реактора ясна. И даже есть уверенность, что плазма не поведет и такой реактор, если бы мы его отважились сейчас построить, будет работать и производить больше энергии, чем расходовать. Но мы сейчас совершенно к этому не готовы. Практически каждый узел реактора требует основательной инженерной проработки.

Первая стенка

Это, пожалуй, самая сложная проблема. Конструкция первой стенки обычно бывает самым уязвимым местом для критики при обсуждении современных проектов реакторов. Всесторонне хорошего решения пока еще не найдено. Ведь надо учесть множество обстоятельств.

Во-первых, на первую стенку идет из плазмы огромный поток тепла. В современных проектах он обычно составляет 300—600 кВт/м². Чтобы стенка не расплавилась, ее надо охлаждать. Охлаждение водой или газом делается с противоположной от плазмы стороны. Отвести такой поток тепла с помощью воды или газа, в общем-то, несложно, но, чтобы температура обращенной к плазме стороны была не слишком высока, толщина стенки должна быть небольшой. Если сделать стенку из нержавеющей стали, то ее толщина должна быть не больше 2 мм. В случае использования алюминиевых сплавов толщина может быть в несколько раз больше. Во-вторых, бомбардировка первой стенки частицами плазмы приводит к распылению металла. При реакторных параметрах плазмы скорость распыления может достигать нескольких миллиметров в год. А это значит, что через 1—2 года работы реактора первую стенку надо менять. Это очень неприятная операция. Помимо того, что надо останавливать реактор и практически полностью его разбирать, стенка еще и радиоактивна. Ведь она подвергается очень интенсивному облучению нейтронами. Нейтроны вступают в ядерные реакции с материалом стенки. Так образуются радиоактивные изотопы. Эта вторичная радиоактивность настолько велика, что ремонт реактора и замену первой стенки могут делать только роботы, управляемые на расстоянии. Люди смогут приблизиться к первой стенке, извлеченной из реактора, только через несколько месяцев или даже лет.

Кроме наведенной радиоактивности, нейтроны вызывают еще ряд неприятных эффектов. Удары нейтронов вызывают смещение атомов и появление дефектов в кристаллической решетке. Из-за этого прочность материалов после облучения нейтронами падает. Кроме того, в результате ядерных реакций внутри стенки образуются протоны и α -частицы. Они захватывают электроны из металла и превращаются в атомы газов — водорода и гелия. При сильном облучении количество этих газов настолько

велико, что металл распухает, становится хрупким и в конце концов разрушается.

Быстрому разрушению первой стенки способствует еще и термическая усталость. Во время горения термоядерной реакции внутренняя поверхность стенки нагревается до 500°C . А за время между циклами стенка успевает охладиться до $300\text{--}400^{\circ}\text{C}$. Колебания температуры вызывают из-за теплового расширения колебания размеров. Возникают термические напряжения. Эти напряжения быстро разрушают металл. Вот насколько сложна проблема первой стенки.

Поэтому одна из главных целей международного токамак-реактора «Интор» — испытания различных материалов для первой стенки в потоках нейтронов реальной интенсивности.

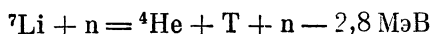
Большую опасность для первой стенки представляют выбросы плазмы во время срывов. Неустойчивость срыва в токамаке сейчас интенсивно исследуется. Пока что удалось нащупать эмпирические правила обращения с плазмой, уменьшающие вероятность срыва, но избежать их полностью еще не удастся. В проектах реактора обычно принимают вероятность срыва в одну тысячную. Это значит, что из тысячи циклов горения плазмы в одном может произойти срыв. А так как за время жизни первой стенки циклов должно быть около 10^6 , в тысяче из них будет срыв. Во время срыва плазма частично или полностью выбрасывается на стенку. При этом в каком-то месте может выделяться энергия в несколько сот джоулей на квадратный сантиметр, в результате чего может произойти плавление и испарение стенки на глубину до нескольких миллиметров. Для решения этой проблемы в некоторых проектах предлагается перед первой стенкой установить неохлаждаемый экран из графита толщиной несколько сантиметров. Температура этого экрана, по-видимому, достигнет до $1200\text{--}1500^{\circ}\text{C}$, но для графита это не страшно. Известно только, что сделают с этим экраном нейтроны.

Бланкет

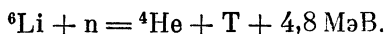
Как уже говорилось, задача blankets максимально использовать все, что могут дать нейтроны. В первую очередь это относится к их кинетической энергии. Рождающиеся в ходе термоядерной реакции нейтроны имеют энергию $14,1\text{ МэВ}$. Они легко пронизывают тоненькую первую стенку, почти не теряя в ней энергии.

Чтобы остановить нейтроны и превратить их энергию в тепло, толщина blankets должна быть 0,5–1 м.

Вторая задача blankets — воспроизводство трития. Для этого используются реакции нейтрона с изотопами лития:



и



В первой реакции развал ядра ${}^7\text{Li}$ происходит за счет энергии нейтрона. Во второй реакции происходит захват нейтрона и развал ядра из-за внутренней неустойчивости. При этом энергия не только не расходуется, но даже еще выделяются 4,8 МэВ.

Таким образом, для воспроизводства трития нужно поместить в blankets вещества, содержащие литий. Поскольку в каждой из этих двух реакций появляется по ядру трития, а нейтрон, освободившийся после первой реакции, можно использовать во второй, поместив в blankets смесь изотопов лития ${}^7\text{Li}$ и ${}^6\text{Li}$, можно получить больше атомов трития, чем было нейтронов, т. е. производство трития становится расширенным. Реактор не только компенсирует собственные расходы трития, но еще и вырабатывает тритий, который можно использовать для следующих реакторов. Тепловая мощность реактора обычно планируется от 2 до 5 миллионов киловатт, при этом в плазме сгорает 10–20 кг трития в год и примерно столько или чуть больше нарабатывается в blankets. В плазме же одновременно содержится лишь около 0,5 г трития.

Еще одна сложность в конструировании и эксплуатации реактора связана с радиоактивностью трития. Чтобы исключить попадание трития в атмосферу в случае аварии или течи в вакуумной камере токамака, весь реактор будет заключен в вакуумный дом.

Нейтроны — это тоже ценный товар

Кроме электроэнергии, термоядерный реактор в большом количестве производит нейтроны. В термоядерном реакторе их вырабатывается в 3–4 раза больше, чем в реакторе деления той же мощности. Это следует из того, что при реакции деления ядра урана выделяется 170 МэВ энергии и рождается 2–3 нейтрона, т. е. один нейтрон приходится на 60–80 МэВ энергии. А в термоядерном реакторе один нейтрон приходится на

17,6 МэВ энергии. Правда, значительная часть этих нейтронов расходуется на воспроизводство трития. Но и остается довольно много, чтобы подумать об их рациональном использовании.

Нейтроны ценны тем, что могут вызывать ядерные реакции. Один из наиболее заманчивых путей использования термоядерных нейтронов — переработка изотопов урана и тория.

Наиболее распространенный изотоп урана уран-238 непригоден для использования в большинстве атомных реакторов деления, работающих на тепловых нейтронах, так как для его расщепления нужны быстрые нейтроны с энергией не меньше 1 МэВ. В ядерных реакторах, так же как и в атомной бомбе, работают только уран-233, уран-235 и плутоний-239. В природном уране содержится 0,7% урана-235. Уран-233 и плутоний-239 могут быть получены при облучении нейтронами соответственно тория-232 и урана-238.

Сам по себе природный уран не слишком дорогой. Его запасы исчисляются миллионами тонн. Однако извлечение изотопа уран-235 или хотя бы обогащение этим изотопом природного урана — процессы чрезвычайно дорогие. В процессе обогащения уран делится на две части: меньшая часть, обогащенная изотопом уран-235, используется в реакторах атомных электростанций, а большая часть, обедненная этим изотопом, идет в отвалы. Таким образом, при работе атомных станций образуется в большом количестве обедненный уран с малым содержанием урана-235.

В последние годы разрабатываются реакторы на быстрых нейтронах (бридеры), в которых, кроме выделения энергии за счет деления изотопа уран-235, происходит еще и превращение под действием нейтронного излучения урана-238 в плутоний-239.

Ядра плутония могут быть использованы в обычных ядерных реакторах наравне с ураном-235. Возможность превращения дешевого изотопа уран-238 в плутоний в бридерах позволяет использовать их для увеличения запасов ядерного горючего. Получается парадоксальная ситуация: при работе бридера не только вырабатывается тепловая и электрическая энергии, но еще нарабатывается ядерное топливо. Причем, в количестве большем, чем потребляет сам бридер.

Этот парадокс возникает из-за размножения нейтронов при делении ядра урана-235. В результате облучения эти-

ми нейтронами ядер урана-238 на каждое распавшееся ядро урана-235 рождается больше одного ядра плутония.

Строительство бридеров в широких масштабах позволяет в принципе использовать дешевые запасы урана-238. Однако реально темпы строительства бридеров сдержива-

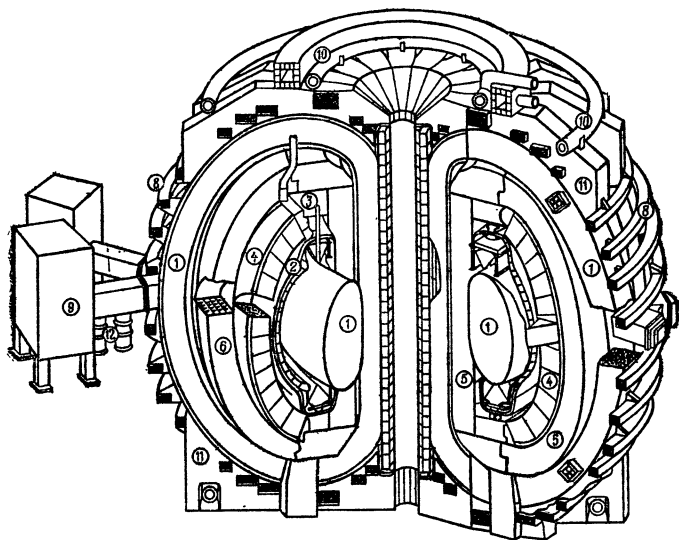


Рис. 11.3. Схема гибридного реактора-токамака: 1 — плазма, 2 — вакуумная камера, 3 — ввод топлива, 4 — бланкет, содержащий уран и литий, 5 — внутренняя защита, 6 — наружная защита, 7 — катушки тороидального поля, 8 — катушки вертикального поля, 9 — пучки нейтральных атомов, 10 — охлаждение, 11 — опорная конструкция, 12 — вакуумные насосы.

ются очень низкой скоростью наработки плутония в них. Типичный бридер мощностью в миллион киловатт нарабатывает в год 70—150 кг плутония. Время удвоения количества плутония для такого бридера 10—20 лет.

В этом отношении термоядерный реактор гораздо эффективнее бридера. Во-первых, в него можно загружать чистый уран-238. Так как нейтроны рождаются в термоядерных реакциях, драгоценный изотоп уран-235 или плутоний, который приходится тратить в бридерах для получения быстрых нейтронов, в термоядерном реакторе вообще не нужны. Во-вторых, количество нейтронов в термоядерном реакторе в несколько раз больше, чем в ядер-

ном реакторе той же мощности. Поэтому гибридный термоядерный реактор мощностью в один миллион киловатт будет производить не 70—150, а 500 или даже 900 кг плутония в год. Это значит, что один такой термоядерный реактор может снабжать топливом 3—4 обычных реактора такой же мощности.

А так как для запуска самого гибридного реактора плутоний не нужен, темпы строительства гибридных реакторов могут быть гораздо выше.

Устройство гибридного реактора показано на рис. 11.3. Оно лишь немного отличается от устройства чистого реактора. Разница, в основном, в составе blanketа. В него, кроме веществ, содержащих литий, входят еще и вещества, содержащие уран.

Уран загружается в blanket в виде отдельных герметично закрытых блоков. Через 2—3 года облучения в нем нарабатывается 1—1,5% плутония. Это оптимальный срок для извлечения плутония. Из-за высокой радиоактивности все операции по извлечению и переработке облученного урана должны проводиться автоматами без участия людей.

Куда девать термоядерную энергию?

Странный вопрос, не правда ли? Ну, конечно, преобразовать в электроэнергию! По крайней мере до сих пор мы все время молчаливо предполагали, что это будет именно так. Но, возможно, это не самый оптимальный способ использования энергии, производимой термоядерным реактором. Ведь коэффициент преобразования тепла в электроэнергию значительно меньше единицы. Кроме того, электроэнергия имеет еще одно неудобство — это товар скоропортящийся. Выработанная электроэнергия должна быть потреблена немедленно.

Способы накопления и сохранения электроэнергии впрямь хотя и существуют, но пока еще слишком дороги и потому в широких масштабах не используются. Это создает массу неудобств. Потому что потребление энергии происходит неравномерно. В дневные и в вечерние часы потребителей чересчур много и мощностей для ее производства всегда не хватает. А в ночные часы и в выходные дни электроэнергию некуда девать. Поэтому одна из центральных задач в развитии энергетики — разработка способов накопления энергии для ее последующего использования на производстве, в быту, на транспорте и т. д.

Пожалуй, самая заманчивая идея в этой области, над которой бьются ученые уже много лет, это накопление энергии в виде идеального топлива — чистого водорода.

Чистый водород — это действительно идеальное топливо. При его сгорании образуется чистая вода и больше ничего. Так что снимается проблема загрязнения окружающей среды. Калорийность водорода значительно выше, чем у традиционных видов топлива, используемых сегодня. Вопросы хранения и безопасного использования водорода не сложнее аналогичных проблем для газа или бензина. Практически приемлемые решения для них уже найдены. Уже проводились успешные испытания автомобилей, работающих на водороде. Единственный недостаток, из-за которого водород в качестве топлива все еще не находит широкого распространения, — это слишком высокая цена его производства.

Самый дешевый водород сегодня получают из природного газа. Но его выделение из газа все равно стоит денег и потому он не может конкурировать с самим газом, если его просто сжигать.

Естественный источник для добычи водорода — вода. Но, к несчастью, молекула воды — одна из самых прочных. Для ее диссоциации на водород и кислород нужна высокая температура — свыше 5000°C . Получение такой высокой температуры довольно сложная проблема. Ее обычно получают в электропечах или с помощью электрической дуги. Но тогда лучше прямая электрическая диссоциация. При электрической диссоциации водород получается легко и сразу в чистом виде, но цена... Цена получается в 4 раза выше, чем у эквивалентного количества обычного топлива.

Когда исследования по проблеме УТС вышли, наконец, на прямую дорогу к цели и один за другим начали появляться детально проработанные проекты термоядерных реакторов, стало очевидным, что наконец-то появился источник тепла, словно специально созданный для добычи водорода.

Ведь в термоядерном реакторе где-то между нагретой до 100 миллионов градусов плазмой и холодными внешними стенками обязательно будет зона с температурой 5000°C . В этой зоне как раз и можно заняться термическим разложением воды.

Как показывают расчеты, реактор тепловой мощностью 10 миллионов киловатт может вырабатывать около миллиона тонн водорода в год. Эффективность использования

энергии реактора при этом получается 0,57 — гораздо выше, чем при производстве электроэнергии. Таким образом, широкое развитие термоядерной энергетики может способствовать решению не только энергетических, но и экологических проблем.

А как же тритий и нейтроны?

Тритий, действительно, радиоактивен. Поэтому при конструировании реактора защите от попадания трития в атмосферу при аварийной ситуации уделяется большое внимание.

Однако, как уже говорилось, трития в плазме очень мало — доли грамма, поэтому опасность не очень велика. Более серьезную проблему представляет бланкет и система переработки трития. Там его несколько килограмм. Однако там он находится в связанном виде и в случае аварии в атмосферу вряд ли попадет.

Гораздо более серьезную опасность представляет падающая радиоактивность материалов конструкции из-за облучения их нейтронами. При облучении стали, например, в ней возникают радиоактивные изотопы железа, кобальта, марганца и никеля. Их радиоактивность в сотни раз превышает радиоактивность трития.

В гибридном реакторе радиоактивность, в основном, определяется продуктами деления урана. Она в десятки раз превосходит радиоактивность элементов конструкции реактора. Так что по степени радиоактивности гибридный реактор не отличается от обычного атомного реактора.

Чистый термоядерный реактор через 10 часов после остановки имеет радиоактивность примерно в 25 раз меньше, чем атомный реактор такой же мощности. А если сравнивать радиоактивность через большой промежуток времени, то разрыв еще более увеличивается. Через 100 лет радиоактивность термоядерного реактора будет в 300 раз ниже, чем у атомного. Это происходит потому, что при работе чистого реактора не образуется долгоживущих изотопов, таких как плутоний, стронций или цезий.

Опыт развития атомной энергетики показал, что при довольно высокой радиоактивности урановых реакторов можно добиться полной безопасности их эксплуатации и надежной защиты окружающей среды. Тем более это справедливо для термоядерных реакторов, радиоактивность которых значительно меньше.

А что говорит экономика?

Перспективы развития термоядерной энергетики зависят, естественно, от ее конкурентоспособности с другими источниками энергии. Как только в результате успехов в исследованиях по удержанию и нагреву плазмы стало ясно, что проблема УТС в принципе разрешима, вопрос о стоимости производства электроэнергии в термоядерном реакторе и о его конкурентоспособности начал обсуждаться всерьез. Появились проекты термоядерных электростанций с оценками стоимости сооружения и эксплуатации.

При этом выяснилось, что из-за отсутствия крупномасштабного промышленного производства многих материалов и узлов, используемых в термоядерных реакторах, их стоимость в настоящее время очень высока. Поэтому стоимость сооружения первых термоядерных электростанций наверняка будет в 2—2,5 раза выше, чем стоимость обычной атомной станции такой же мощности. Со временем, по мере развития соответствующих отраслей промышленности, капитальные затраты на сооружения термоядерных станций будут снижаться. Кроме того, можно получить большую экономию на топливе. Ведь обычная электростанция мощностью в миллион киловатт, работающая на нефти или угле, расходует в год миллионы тонн топлива, стоимость которого исчисляется сотнями миллионов рублей. А термоядерная электростанция потребляет только дейтерий, поскольку тритий восстанавливается в ходе работы самой станции, т. е. просто воду.

Для обеспечения топливом термоядерной электростанции мощностью в миллион киловатт нужно всего лишь несколько кубических метров воды в сутки!

Ну, конечно, на самом деле переработка воды и добыча из нее дейтерия будет производиться не на самой электростанции, а централизованно для всех электростанций страны сразу. Процесс этот давно и хорошо отработан и уже сейчас настолько дешев, что затраты на дейтерий не идут ни в какое сравнение с затратами на обычное топливо.

Так как капитальные затраты для крупных электростанций ниже, то конкурентоспособность термоядерной электростанции растет с повышением ее мощности. Поэтому термоядерные станции выгодно строить очень крупными — мощностью до 10 миллионов киловатт или даже выше. Энергетикам еще предстоит осваивать методы управления агрегатами такой единичной мощности.

С точки зрения проблем электрификации страны немаловажное преимущество термоядерных станций состоит еще и в том, что их можно строить где угодно. Они не нуждаются в железной дороге для подвоза огромных количеств топлива. С другой стороны, полная безопасность и экологическая чистота термоядерных станций позволит строить их вблизи больших городов, т. е. рядом с потребителем, экономя тем самым изрядную сумму еще и на линиях электропередачи.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На первый взгляд более чем 30-летняя история исследований по проблеме управляемого термоядерного синтеза и 15—20-летние перспективные планы для достижения практических результатов создают впечатление, что работа по этой проблеме идет чрезвычайно медленно. Но это только на первый взгляд. На самом деле работа ведется очень интенсивно и каждый год происходит заметное продвижение к цели.

Уже за то время, которое потребовалось для написания этой книги, замечен существенный прогресс в исследованиях по всем основным направлениям.

Токамаки. В исследованиях на токамаках основное внимание в последние годы уделялось развитию методов нагрева плазмы с помощью радиоволн. Этот метод нагрева гораздо более экономичен, чем пучки быстрых атомов, с помощью которых впервые удалось приблизиться к термоядерной температуре в опытах на токамаке «ПЛТ». Поэтому для нагрева плазмы до точки зажигания в будущем термоядерном реакторе скорее всего будут использованы именно радиоволны. Мощность генераторов радиоволн на крупнейших установках за последние годы достигла уровня мегаватт.

Наибольших успехов в нагреве плазмы радиоволнами добились советские ученые. На токамаке «Т-10» с помощью шести гиротронов общей мощностью 0,8 МВт удалось поднять электронную температуру плазмы до $45 \cdot 10^6$ К. В этом опыте использовался электронный циклотронный резонанс, когда частота радиоволн совпадала с частотой вращения электронов в магнитном поле.

Этот результат выгодно отличается своей экономичностью от знаменитого рекордного нагрева плазмы пучками быстрых атомов на токамаке «ПЛТ». Там для нагрева

плазмы до температуры $60 \cdot 10^6$ К потребовалась мощность втрое большая — 2,4 МВт.

Правда, и в том и в другом опыте плотность плазмы была значительно ниже, чем нужно для термоядерного реактора. В этом плане наибольших успехов добились американские ученые на токамаке с очень сильным магнитным полем «Алкатор С». С помощью генератора радиоволн мощностью около 1 МВт им удалось нагреть до $33 \cdot 10^6$ К плазму с плотностью $2 \cdot 10^{20}$ м⁻³, как раз такой, какая будет в реакторе.

С точки зрения экономичности работы будущего реактора, как мы уже говорили, очень важную роль играет параметр β — отношение давления плазмы к давлению магнитного поля. В реакторе величина β должна быть не менее 8—10%. Пока что она, как правило, около 1% или даже меньше. Теоретики указывают на множество проблем, которые усложняют удержание плазмы в токамаке при увеличении β . Если рассматривать плазму как газ, то ее давление можно определить как произведение плотности на температуру: $P=nT$. Поэтому увеличения β можно добиться за счет увеличения температуры и плотности плазмы, т. е. увеличение β , кроме проблемы удержания, связано еще и с возможностями нагрева плазмы.

С другой стороны, увеличить β можно еще и путем уменьшения индукции магнитного поля. Такие эксперименты уже проводятся на существующих установках. Именно этим способом были проведены опыты по удержанию плазмы на советском токамаке «Т-11» и американском «Дуплет III». В этих опытах, вопреки предсказаниям теоретиков, было продемонстрировано успешное удержание плазмы при β до 4,5%.

Большое значение для токамака-реактора имела бы возможность избавиться от импульсного режима работы, обусловленного индуктивным методом возбуждения тока в плазме. С этой целью в последнее время на многих установках проводятся опыты по поддержанию тока в плазме токамака с помощью радиоволн. Наибольших успехов в этом направлении добились советские и чехословацкие ученые на токамаке «Т-7», где был получен ток до 200 кА, а также американские ученые на токамаке «ПЛТ», где ток в 160 кА поддерживался радиоволнами целых 4 секунды.

Продолжается строительство токамаков следующего поколения — советского «Т-15», американского «ТФТР», западноевропейского «ДжЕТ», японского «ДжТ-60». Эти огромные установки должны продемонстрировать возмож-

ность достижения основных термоядерных параметров — плотности, температуры и времени удержания плазмы.

Западноевропейский токамак «ДжЕТ» и американский «ТФТР» уже собраны. В них даже получена плазма, правда пока еще не готовы никакие методы дополнительного нагрева. Так что плазма по современным меркам довольно холодная — температура электронов около 10 миллионов кельвинов. Зато время удержания, благодаря большим размерам установки, сразу же получилось внушительным — 0,3 с. Не обошлось и без приключений. Во время сборки мощного генератора, питающего электрическим током обмотки основного магнитного поля токамака «ТФТР», произошел редкостный несчастный случай — разогнулся крюк у подъемного крана и ротор генератора массой около 200 т упал на статор и повредил его. Это был один из двух таких генераторов. Так что пока «ТФТР» работает на половинной индукции магнитного поля.

На строительстве советского токамака «Т-15» и японского «ДжТ-60» идет изготовление отдельных частей и блоков. Советский токамак будет иметь сверхпроводящие обмотки из сплава ниобия с оловом. Изготовление таких обмоток — процесс очень сложный и длительный.

По-видимому, эксперименты на всех четырех установках развернутся в полную силу в 1986—1987 гг. А основной результат — достижение термоядерных условий и демонстрация производства в плазме количества термоядерной энергии, превосходящей вложенную, — будет получен до конца этого десятилетия.

Стеллараторы. На стеллараторах, так же как и на токамаках, начались интенсивные исследования нагрева плазмы радиоволнами. Только мощности генераторов пока еще не превышают одной-двух сотен киловатт. Соответственно и результаты более скромные: температура электронов или ионов поднимается до 7—10 миллионов кельвинов. Такие результаты получены на советском стеллараторе «Л-2», японском «Гелиотрон Е», немецком «Вандельштейн-7А».

Но на самом деле эти достижения стеллараторов гораздо более впечатляющие. Потому что нагрев плазмы, как мы уже знаем из опыта токамаков, — это только вопрос мощности. А вот в области удержания плазмы в стеллараторах за последнее время имеются выдающиеся достижения. Мы уже рассказывали в гл. VIII о том, что с переходом стеллараторов в бестоковый режим, когда в плазме нет тока, искажающего структуру магнитного поля, время удержания плазмы в стеллараторах резко возросло. За

последний год стеллараторы продвинулись еще дальше. Впервые в исследованиях на токамаках и стеллараторах время удержания энергии совпало с предсказаниями неоклассической теории.

Эта теория учитывает влияние на движение частиц плазмы структуры магнитного поля и столкновений частиц между собой. В ее создание и разработку выдающийся вклад внесли советские теоретики Р. З. Сагдеев, А. А. Галеев, Б. Б. Кадомцев, В. Д. Шафранов и Л. М. Коврижных.

Неоклассическая теория учитывает только неизбежные потери тепла плазмой, и ее предсказания дают минимальную величину для скорости потерь тепла из ловушки. Обычно, а на токамаках это и до сих пор так, не до конца подавленные неустойчивости, искажения структуры магнитного поля ловушки токама, текущими по плазме, и еще какие-то неизвестные пока причины приводят к тому, что реальная скорость потерь тепла в несколько десятков раз превышает предсказания неоклассической теории.

В этом свете совпадение экспериментально наблюдаемого времени жизни энергии в стеллараторах с предсказаниями неоклассической теории означают, что наконец-то в стеллараторах получена спокойная плазма, поведение которой полностью поддается расчету и может быть предсказано.

Это выдающееся достижение получено в результате встречного движения теории и эксперимента. С одной стороны, Л. М. Коврижных удалось более детально учесть влияние на удержание плазмы в стеллараторах электрического поля, возникающего в плазме из-за различия в скорости ухода из ловушки электронов и ионов. С другой стороны, переход на бестоковую плазму позволил существенно увеличить экспериментальное время удержания энергии плазмы.

Если такую же спокойную плазму удастся сохранить в стеллараторах и при переходе к термоядерным значениям плотности и температуры, реактор-стелларатор обещает быть очень экономичным.

Ловушки с магнитными пробками. На этом направлении наиболее энергично развивается в последнее время концепция тандемной ловушки. Эксперименты на советской ловушке «Амбал», японской «Гамма-6», американской «ТМХ» подтвердили основную идею — добавление ловушек с повышенной плотностью плазмы на концах основной ловушки действительно приводит к появлению

сильного электрического поля, которое улучшает удержание ионов в основной ловушке.

Дальнейшее развитие тандемных ловушек идет в направлении повышения параметров плазмы, снижения удельных затрат на поддержание нужного электрического поля. С этой целью между основной и запирающей концевой ловушками вводится еще одна небольшая пробочная ловушка, заполненная плазмой с очень горячими электронами — «тепловой барьер». Горячие электроны проникают в центральную ловушку и поддерживают в ней необходимый для удержания ионов отрицательный потенциал. Введение «теплового барьера» позволяет обойтись значительно меньшей плотностью плазмы в крайних ловушках, чем это было бы необходимо в простой тандемной ловушке. Основанные на идее «теплового барьера» ловушки строятся и должны вступить в строй уже в этом году.

Пинчи и плазменный фокус. Развитие исследований плазменного фокуса идет в направлении паразитирования вкладываемой в разряд энергии. Уже появились установки с энергией до 1 МДж. В итальянской установке «Фраскати-1» при такой энергии получен нейтронный выход до 10^{12} нейтронов за импульс. Слабым местом плазменного фокуса остается малое время удержания: значение ηt по-прежнему примерно в 1000 раз меньше, чем нужно по критерию Лоусона. Но независимо от термоядерных применений исследования плазменного фокуса интенсивно ведутся во многих странах, поскольку он обещает стать одним из наиболее дешевых источников нейтронов.

Новые идеи появились и в отношении самого старого направления термоядерных исследований — пинчей. В Ленинградском институте электрофизической аппаратуры имени Д. В. Ефремова создана комбинированная установка «Коллапс» из мощного лазера на углекислом газе «ТИР-1М» и тета-пинча «Утро». Идея опыта состоит в том, чтобы создать и предварительно нагреть плазму с помощью лазера, а затем сжимать уже готовую плазму в тета-пинче. Расчеты показывают, что таким образом в момент максимального сжатия можно повысить температуру в 4 раза.

Инерционное удержание. В направлении лазерного термоядерного синтеза продолжаются исследования на установках с энергией в импульсе до 10 кДж. Только что вступила в строй американская установка «Нова» с лазером на 100 кДж, что является существенным шагом вперед, но все равно этого еще недостаточно. Энергия, необходимая

для поджига термоядерной реакции с инерционным удержанием, по-прежнему исчисляется мегаджоулями. Поэтому все большее внимание привлекает идея использовать вместо лазеров мощные ускорители.

Особенно большие надежды связаны с развитием ускорителей легких ионов, например, лития. На них уже получены пучки с энергией 1 МДж, а к 1986 г. планируется создание пучков с энергией 4 МДж. Для поджига термоядерной реакции с помощью пучков легких ионов по оценкам требуется энергия около 10 МДж, так что в этом отношении пучки легких ионов ближе к цели, чем лазеры.

Проекты реакторов. Успехи в экспериментах по нагреву и удержанию плазмы в магнитных ловушках стимулировали разработку проектов опытного термоядерного реактора. Такая работа ведется уже несколько лет всеми ведущими странами как в рамках проекта международного реактора «Интор», так и в национальных программах.

В нашей стране уже началось обсуждение опытного термоядерного реактора (ОТР). Это будет, по-видимому, гибридный термоядерный реактор. Нагретая до термоядерной температуры плазма будет окружена слоем дешевого изотопа уран-238, с тем чтобы рождающиеся в термоядерных реакциях нейтроны превратили его в драгоценный изотоп плутоний-239, который можно потом использовать для производства энергии на обычных атомных станциях. Этот прием позволяет увеличить производство энергии в 5—7 раз. Соответственно снижаются требования к удержанию плазмы. Как раз для первого реактора, когда вопросы удержания плазмы еще не совсем доработаны, это может оказаться очень важным.

Сейчас уже ясно, что первый реактор будет реактор-токамак примерно таких размеров: тор радиусом 5—6 м, радиус плазмы немного больше 1 м, а объем плазмы 250—300 м³. Тепловая мощность ОТР получается около 1000 МВт. При к.п.д. преобразования тепла в электроэнергию, равного 30%, электрическая мощность ОТР будет около 300 МВт; из них 200 МВт реактор будет потреблять на собственные нужды, а во внешнюю сеть выдавать 100 МВт электроэнергии, 700 МВт тепла и 200 кг плутония в год.

Специалисты считают, что при достаточно интенсивной работе опытный термоядерный реактор может быть построен через 10—12 лет, т. е. до 1996 г.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие	3
Глава I. ТЕРМОЯДЕРНАЯ ПРОБЛЕМА	5
Сверхсекретные исследования (5). Как возникла проблема (5). Как устроено атомное ядро (8). Откуда берется ядерная энергия? (8) Борьба с кулоновским отталкиванием (12). Что происходит на Солнце? (14) А в водородной бомбе? (15) От чего же зависит скорость реакции? (16) Раз, два и в дамки! (17) Пучок плюс плазма (18). Какая же нужна температура? (19) Что такое плазма? (23) Как действует на заряженную частицу электрическое поле (24) ...и магнитное (24). Коллективные движения частиц плазмы (27). Идея магнитного удержания (28).	
Глава II. САМОСЖИМАЮЩИЕСЯ РАЗРЯДЫ	33
Пусть плазма держит себя сама! (33). Есть сжатие! (35) Есть нейтроны! (35) Тета-пинч (39). Плазменный фокус (43). Карта поля боя (45).	
Глава III. МАГНИТНЫЕ ЛОВУШКИ	46
Первые опыты (49). «Палки Иоффе», принцип «минимума В». (55) Другие неустойчивости (59). Метод грубой силы (60). Тандемные ловушки (61). Посмотрим на карту поля боя (65).	
Глава IV. СТЕЛЛАТОР	66
Сделаем ловушку замкнутой! (66) Дивертор (71). Винтовая обмотка. Шир (73). Начало сотрудничества (76). Зато у соседей — благодать! (82)	
Глава V. ТОКАМАК	84
Баллонный эффект (86). Детство (87). Токамак-1 (88).	
Глава VI. ПРОБЛЕМА НАГРЕВА	95
Каждой домохозяйке свой токамак! (95) Как греть плазму? (99) Адиабатическое сжатие (100). Пучки быстрых атомов (101). Пусть работает перезарядка (102). Но не только в мощности дело (104). УВЧ-терапия плазмы (105). Большая мощность — это еще не все! (107) Дивертор (109).	
Глава VII. 60 МИЛЛИОНОВ ГРАДУСОВ В ТОКАМАКЕ	111
Трудности и неприятности (112). Вот это да! (113) Ночной рекорд (114). А что же дальше? (116) Наступление широким фронтом (116).	

Г л а в а VIII. ВОЗРОЖДЕНИЕ СТЕЛЛАРАТОРОВ	122
А все-таки, почему же он не работает? (122) Чем заплатки ставить, лучше новое шить! (125) Электротехникам не легче, чем физикам (125). Когда стелларатор работает как стелларатор (128). Следующий шаг в стеллараторной программе (132). Снова оргвыводы (135).	
Г л а в а IX. ИНЕРЦИОННОЕ УДЕРЖАНИЕ	136
А может быть, совсем не удерживать плазму? (137) Первые прикидки (138). Что же делать? (139) Попробуем сначала на девяти (141). Вперед на штурм! (144) Скорость переноса тепла слишком мала! (145). Скорость переноса тепла слишком велика! (146) Давление света три миллиона атмосфер! (147) Чем сложнее мишень, тем проще лазер (148). Лазеры для УТС (152). Лазерный реактор (154). Другие способы (156). Смотрим опять на карту поля боя (159).	
Г л а в а X. МЮ-МЕЗОННЫЙ КАТАЛИЗ	160
Упорство одиночек или польза академической науки (163). Не может этого быть! (164) И такое бывает... (165) Карманный реактор (167). А почему нынче мю-мезоны? (167) На помощь приходит уран (168).	
Г л а в а XI. ТЕРМОЯДЕРНЫЙ РЕАКТОР	169
Через пропасть в три прыжка (169). Как устроен реактор? (172) Проблемы, проблемы... (174) Первая стенка (175). Бланкет (176). Нейтроны — это тоже ценный товар (177). Куда девать термоядерную энергию? (180) А как же третий и нейтроны? (182) А что говорит экономика? (183)	
З а к л ю ч е н и е	184

Геннадий Степанович Воронов

ИШТУРМ ТЕРМОЯДЕРНОЙ КРЕПОСТИ

Редактор *Л. А. Панюшкина*

Техн. редактор *Л. В. Лихачева*

Корректоры *Л. И. Назарова, М. Л. Медведская*

ИБ 12645

Сдано в набор 25.04.84. Подписано к печати 29.01.85. Т-01250. Формат 84×108^{1/8}.
Бумага тип. № 3. Обыкновенная гарнитура. Высокая печать. Усл. печ. л. 10,08.
Усл. кр.-отт. 10,5. Уч.-изд. л. 10,4. Тираж 100000 экз. Заказ № 133. Цена 30 коп

Ордена Трудового Красного Знамени издательство «Наука»
Главная редакция физико-математической литературы
117071 Москва В-71, Ленинский проспект, 15

2-я типография издательства «Наука»,
121099 Москва Г-99, Шубинский пер., 6

30 коп.
