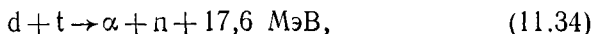


В реакторе на быстрых нейтронах нет замедлителя, что резко уменьшает объем активной зоны. Но, как мы знаем, из-за закона « $1/v$ » сечения реакций на быстрых нейтронах очень малы по сравнению с соответствующими сечениями на медленных нейтронах. Поэтому критическая масса горючего (но не всей активной зоны) в реакторе на быстрых нейтронах значительно больше, чем на медленных. Отсюда следует, что реактор на быстрых нейтронах имеет низкую удельную мощность, т. е. мощность на килограмм делящегося вещества в реакторе. Удельная мощность реакторов на быстрых нейтронах примерно в пять раз ниже, чем тепловых. Удельная мощность вместе с коэффициентом воспроизводства и временем задержки топлива в процессе его переработки определяют практически важную характеристику реактора-размножителя, называемую *временем удвоения*. Время удвоения — это промежуток времени, за который количество топлива в системе удваивается. Согласно оценкам реальное значение времени удвоения составляет примерно 10 лет.

Эксплуатация реакторов-размножителей на быстрых нейтронах сопряжена со значительными трудностями, связанными главным образом с исключительно высокой плотностью энерговыделения и с трудностью регулирования, возникающей в связи с тем, что регулирующие стержни слабо поглощают быстрые нейтроны. Высказывались мнения, что строительство промышленных энергетических установок на быстрых нейтронах вообще нереально. Сейчас, однако, доказано, что энергетика на быстрых нейтронах столь же реальна, как и на медленных. В США с 1962 г. эксплуатировался энергетический реактор на быстрых нейтронах «Энрико Ферми» с электрической мощностью 60 МВт. В СССР первый экспериментальный реактор БР-2 на быстрых нейтронах был создан в 1956 г. в Обнинске. На Шевченковской АЭС с 1972 г. работает энергетический реактор на быстрых нейтронах БН-350. Его тепловая мощность 650 МВт, электрическая — до 120 МВт. Он используется для получения пресной воды из Каспийского моря и вырабатывает до 80000 тонн пресной воды в сутки. В Мелекесе работает реактор на быстрых нейтронах БОР-60 мощностью 60 МВт. На Белоярской АЭС сооружается реактор БН-600 с электрической мощностью 600 МВт. Ведутся разработки быстрого реактора БН-1600, который в будущем должен стать основой серийных блоков АЭС. За рубежом работают два энергетических реактора на быстрых нейтронах, один в Англии, а другой — во Франции.

§ 4. Управляемый термоядерный синтез

1. Получение энергии в термоядерных реакциях синтеза связано с осуществлением в макроскопических масштабах управляемой реакции



для которой наиболее низок кулоновский барьер и наиболее велико сечение взаимодействия при малых энергиях.

Для преодоления кулоновского барьера сталкивающимся ядрам необходимо сообщить достаточно высокие энергии. На первый взгляд кажется, что для этой цели можно использовать сильноточный ускоритель низкой энергии. Количественные оценки, однако, показывают, что подавляющая часть ускоренных дейтронов, попав в вещество, растеряет свою энергию на ионизацию (см. гл. VIII, § 2), не успев произвести реакцию (11.34). В настоящее время считается, что единственным способом осуществления термоядерных реакций является разогрев смеси реагирующих ядер до температуры порядка сотни миллионов градусов. При такой температуре любое вещество превращается в полностью ионизованную плазму. Поэтому создание термоядерного реактора упирается в технологическую проблему создания долгоживущей высокотемпературной плазмы.

Приведем оценку параметров плазмы, необходимых для поддержания в ней стационарной термоядерной реакции. Пусть плазма имеет температуру T и состоит из дейтерия и трития с одинаковыми концентрациями $n/2$. Обозначим через τ время удержания горячей плазмы в рабочем объеме. По истечении этого времени горячая плазма уходит и заменяется новой, относительно холодной, приток которой должен быть обеспечен. Условие стационарности состоит в том, что за время удержания выделение термоядерной энергии должно быть достаточным для разогрева вновь поступающей плазмы и для компенсации потерь (происходящих в основном за счет тормозного излучения электронов в поле ядер). Из баланса мощности для условия стационарности получается уравнение

$$n\tau = f(T), \quad (11.35)$$

где $f(T)$ — функция, вид которой зависит от интенсивности процессов теплообмена в плазме. При разумно оптимистичных допущениях о ходе этих процессов для $n\tau = f(T)$ получается зависимость, приведенная на рис. 11.6. Величина $n\tau$ называется *параметром удержания*. Реакция идет при $n\tau \geq f(T)$. Технические трудности достижения области стационарной реакции, по-видимому, мини-

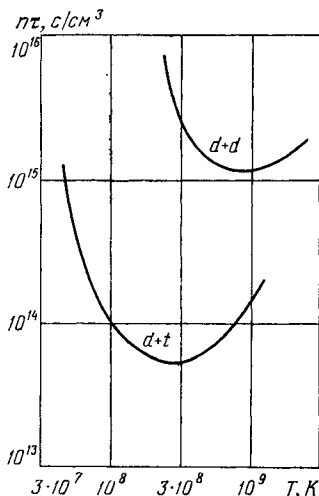


Рис. 11.6. Зависимость параметра $n\tau$ удержания от температуры для термоядерных реакций $d + t$ и $d + d$.

мальны в районе минимума кривой $n\tau$. Из рис. 11.6 видно, что для реакции $d + t$ точке минимума соответствуют значения

$$n\tau = 10^{14} \text{ с/см}^3, \quad (11.36)$$

$$T = 2 \cdot 10^8 \text{ К} (\approx 17 \text{ кэВ}). \quad (11.37)$$

Условия типа (11.36), (11.37) называются *критерием Лоусона*. Для сравнения приведем значения критерия Лоусона для реакций $d + d$ (11.2) (см. рис. 11.6) и $d + {}_2\text{He}^3$ (11.4):

$$d + d \begin{cases} n\tau = 10^{16} \text{ с/см}^3, \\ T = 10^9 \text{ К}, \end{cases}$$

$$d + {}_2\text{He}^3 \begin{cases} n\tau = 10^{15} \text{ с/см}^3, \\ T = 10^9 \text{ К}. \end{cases}$$

Эти оценки подтверждают, что реакцию $d + t$ осуществить проще.

Мы приходим к выводу, что необходимыми условиями осуществления управляемой термоядерной реакции является получение плазмы, удовлетворяющей критерию Лоусона (11.36), (11.37).

2. Перечислим основные принципиально возможные способы достижения параметров $d - t$ -плазмы, соответствующих критерию Лоусона (11.36), (11.37).

Для получения плазмы высоких (порядка 10^8 К) температур могут быть использованы следующие механизмы нагрева:

а) выделение джоулева тепла при пропускании тока через плазму; этот механизм пригоден в начальных стадиях нагрева, но с повышением температуры до 10^7 К становится совершенно неэффективным, так как сопротивление плазмы быстро падает с ростом температуры;

б) сжатие плазмы электродинамическими силами при прохождении через нее тока; сжатие обусловлено притяжением параллельных ниток тока в плазме («пинч»-эффект); при быстром сжатии происходит как адиабатический разогрев, так и выделение тепла за счет ударных волн и турбулентных процессов;

в) нагрев высокочастотным электромагнитным полем;

г) нагрев пучками нейтральных атомов достаточно высоких энергий;

д) нагрев интенсивным лазерным излучением;

е) нагрев интенсивными электронными пучками.

С помощью перечисленных методов нагрева технически вполне достижимы потоки энергии, более чем достаточные для получения нужных температур. Главная трудность состоит в проблеме удержания высокотемпературной и достаточно плотной плазмы в рабочем объеме.

Необходимым условием решения этой проблемы является выполнение критерия Лоусона (11.36). Реальные границы возможных зна-

чений параметров n и τ , входящих в этот критерий, таковы. Нижняя граница n_{\min} плотности плазмы определяется тем, что для технологически приемлемых размеров термоядерного реактора (не более 100 м^3) и мощности термоядерной электростанции (не менее 10^6 кВт) удельная мощность выделения термоядерной энергии в плазме должна иметь порядок как минимум десятков $\text{Вт}/(\text{см}^3 \cdot \text{с})$ (в ядерных реакторах эта величина составляет примерно $80 \text{ Вт}/(\text{см}^3 \cdot \text{с})$). Отсюда для плотности плазмы получается ограничение $n_{\min} = 10^{14}$ частиц/ см^3 . Время удержания такой плазмы должно удовлетворять условию $\tau \geq 1 \text{ с}$. Нижняя граница τ_{\min} времени удержания определяется временем разлета плазмы при отсутствии удерживающих устройств. Для высокотемпературной плазмы из рабочего объема 1 м^3 время естественного разлета составляет 10^{-6} с . Но осуществление макроскопической реакции за такой промежуток времени представляет собой уже не горение, а взрыв. Поэтому, чтобы процесс был управляемым и не приводил к разрушению установки, необходимо уменьшить размеры рабочего объема до $1\text{--}2 \text{ мм}$. Это в свою очередь приводит к уменьшению времени естественного разлета примерно до 10^{-9} с . Отсюда для термоядерной плазмы в отсутствие удержания получаем $\tau_{\min} = 10^{-9} \text{ с}$ и соответственно $n \geq 10^{23} \text{ см}^{-3}$.

В настоящее время научные разработки по получению высокотемпературной $d-t$ -плазмы, удовлетворяющей критерию Лоусона, ведутся с двух сторон: со стороны низких (n_{\min}) плотностей и со стороны малых (τ_{\min}) времен удержания.

3. При низких плотностях главной трудностью является достижение нужного времени удержания (порядка секунды). Очевидно, что никакие стенки из вещества здесь не годятся. При соприкосновении со стенками плазма мгновенно охладится и вдобавок испарит стенку. Единственным известным методом длительного удержания высокотемпературной плазмы является ее термоизоляция магнитным полем. Идея такого удержания была высказана в нашей стране в 1950 г. (И. Е. Тамм и др.) и в США в 1951 г. (Л. Спитцер). В основу этой идеи положен уже упоминавшийся пинч-эффект, т. е. поперечное сжатие плазмы при прохождении через нее электрического тока. Вполне достижимы такие токи, при которых силы сжатия достаточны для преодоления давления плазмы и тем самым для отжатия ее от стенок. Соприкосновения плазмы с торцевыми электродами можно избежать, если сделать рабочий объем замкнутым, например, в форме тора.

Главной трудностью осуществления магнитной термоизоляции плазмы оказалась крайняя неустойчивость плазмы практически во всех магнитных полях, имеющих простую геометрическую форму. Например, прямолинейный плазменный «шнур», удерживаемый текущим через него током, неустойчив относительно образования перегибов или перегибов (рис. 11.7). Раз возникнув, такие деформации

экспоненциально нарастают и за время порядка микросекунд разрушают плазменный шнур либо отбрасывают его на стенки камеры.

Наряду с только что отмеченным в плазме существует много других легко возбуждаемых механизмов неустойчивости. Поэтому проблема устойчивости является главным препятствием на пути создания управляемой термоядерной установки. Для решения этой

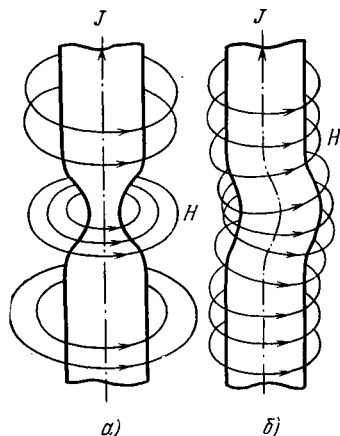


Рис. 11.7. Простейшие типы неустойчивостей в плазменном шнуре.

а) «Перетяжка», б) «перегиб».

Стрелки вдоль оси шнура показывают направление тока, стрелки на окружностях — направления магнитного поля, создаваемого током в плазме.

проблемы предлагались и испытывались различные конструктивные решения, последовательное изложение которых выходит за рамки настоящей книги. Для примера приведем принципиальную схему установки типа «Токамак», предложенной и впервые осуществленной в СССР (И. Н. Головин, Н. А. Явлинский, Л. А. Арцимович с учениками, 1951). Схема «Токамака» приведена на рис. 11.8. Рабочая камера имеет тороидальную форму. Камеру охватывают катушки с током, создающие сильное (десятки килогаусс) продольное магнитное поле. Это поле подавляет наиболее опасные неустойчивости плазменного шнура типа перегибов и перетяжек. Создание плазмы, отрыв ее от стенок и нагревание производится током газового разряда, вызываемого индукционным путем. Для этого сквозь центральное окно тороидальной камеры продевают железный сердечник с намотанной на него первичной обмоткой. Вторичной обмоткой служит непосредственно камера с газом. При прохождении переменного тока через обмотку сердечника в газе возбуждается ток, создающий и нагревающий плазму.

На построенных к настоящему времени токамаках удалось вплотную подойти к термоядерным условиям. Так, на «Токамаке-10» (СССР, 1975 г.) получена плазма с параметрами

$$T \approx 1 \text{ кэВ} (10^7 \text{ K}), \quad n \approx 8 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}, \quad \tau \approx 0,06 \text{ с.} \quad (11.38)$$

На американском токамаке «Алкатер» получено

$$n\tau \approx 2 \cdot 10^{13} \text{ с/см}^3, \quad T \approx 0,5 \text{ кэВ} (5 \cdot 10^6 \text{ K}).$$

Максимальная температура ионов $T = 2 \text{ кэВ}$ при $n\tau \sim 10^{12}$ была достигнута при дополнительном нагреве инжекцией нейтральных

атомов. Эти значения уже недалеко от критерия Лоусона. Поэтому установки типа «Токамак» большинство специалистов считает наиболее перспективными. Исследования по магнитной термоизоляции плазмы ведутся широким фронтом. Не исключено, что критерий Лоусона удастся достигнуть на установках других типов.

4. Рассмотрим теперь перспективы создания термоядерных условий при больших плотностях плазмы. Вообще говоря, при любых

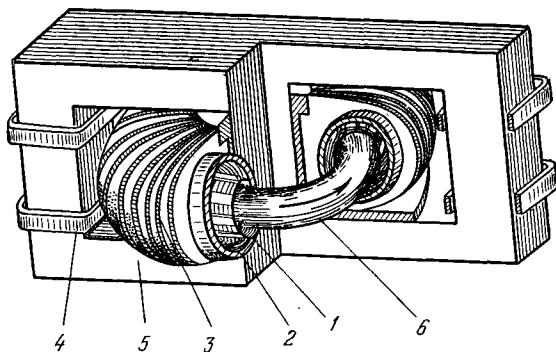


Рис. 11.8. Схема установок «Токамак».

1 — внутренняя камера, 2 — внешняя медная камера, 3 — обмотка, создающая продольное магнитное поле, 4 — первичная обмотка трансформатора, 5 — железный сердечник, 6 — плазменный вигок.

плотностях n плазмы можно указать такие ее размеры R , при которых отпадает необходимость в каком-либо специальном удержании плазмы. Действительно, время разлета свободной плазмы по порядку величины равняется R/v , где v — скорость ионов в плазме (при температуре $T = 10$ кэВ скорость дейтронов и ядер трития равняется примерно 10^8 см/с). Отсюда из условия (11.36) Лоусона получим, что при

$$R \gtrsim 10^{14} \cdot v/n \approx 10^{22}/n \quad (11.39)$$

время разлета свободной плазмы превышает необходимое время ее удержания.

Трудности создания термоядерного реактора при этом, однако, не исчезают, а переносятся с проблемы удержания горячей плазмы на проблему мгновенного (т. е. за время, меньшее R/v) ее нагревания до температуры $T \approx 10$ кэВ. При твердотельной плотности $n = 4,5 \cdot 10^{22}$ см⁻³ (плотность замороженной равнокомпонентной d-t-смеси) необходимая для нагревания плазмы энергия

$$E = \frac{4\pi}{3} R^3 \cdot n \cdot 2 \cdot \frac{3}{2} kT \approx \frac{3 \cdot 10^{52}}{n^2} \quad (11.40)$$

относительно невелика:

$$E \approx 1,5 \cdot 10^7 \text{ Дж} = 15 \text{ МДж.}$$

Но внедрить ее в образец нужно за время Δt , меньшее времени $R/v \approx 2 \cdot 10^{-9}$ с разлета образующейся плазмы. (Заметим, что при твердотельной плотности размеры нагреваемого образца согласно (11.39) имеют порядок 0,2 см.)

Необходимые концентрации энергии могут быть в принципе созданы с помощью лазеров (Н. Г. Басов, О. Н. Крохин, 1962) и импульсных пучков релятивистских электронов (Е. К. Завойский, 1968). В обоих этих методах уже сейчас уверенно регистрируются 14-мегавольтные термоядерные нейтроны (остающиеся 3,6 МэВ приходятся на ядро ${}^4_2\text{He}$). Однако на пути создания термоядерного реактора высокой плотности все еще остаются значительные трудности. Перспективы создания лазерного термоядерного реактора зависят от того, в какой мере на опыте удастся осуществить предсказанное теоретически сильное (в 10^3 — 10^4 раз) сжатие мишени под действием сферически симметричного лазерного импульса, специальным образом зависящего от времени. Действительно, в отсутствие сжатия необходимая для нагревания твердотельной плазмы энергия равняется десятку мегаджоулей. Наиболее мощные лазеры, например установка «Шива» в Ливерморской лаборатории США, обладают энергией в импульсе около 10 кДж. Лазеры с энергией в импульсе 10^6 — 10^7 Дж появятся, видимо, не скоро. При тысячекратном сжатии мишени необходимая энергия согласно (11.40) уменьшается в миллион раз, так что появляется возможность уже с современными лазерами достичь условия (11.36) Лоусона. В лазерных системах достижение критерия Лоусона, однако, не будет означать, что мы находимся накануне их промышленного использования. Дело в том, что при нагревании плазмы лазерами используется не электрическая, а световая форма энергии, которая получается из электрической с к. п. д. порядка 1%. Поэтому для промышленного применения лазерных систем критерий Лоусона нужно превзойти по крайней мере в 100 раз. Создание демонстрационного лазерного термоядерного реактора специалисты прогнозируют к 2000 г.

Пучки релятивистских электронов имеют существенные преимущества перед лазерами в отношении к. п. д. преобразования энергии (не нужно преобразовывать электрическую энергию в когерентное электромагнитное излучение). Однако для них трудной проблемой является фокусировка и концентрирование энергии в малом объеме. Тем не менее уже с имеющейся технологией использования электронных пучков может быть получен термоядерный микровзрыв с усилением энергии примерно в 20 раз. Для этого в СССР проектируется ускорительный комплекс «Ангара-5», состоящий из 48 пучков с суммарным током 50 МА, энергией 5 МДж и длительностью

импульса 60—80 нс. Есть мнение, что системы с релятивистскими пучками близки к достижению критерия Лоусона.

Укажем, наконец, что для импульсного нагревания плазмы сейчас разрабатываются способы использования релятивистских пучков очень тяжелых ионов (например, урана). В США к лету 1979 г. должна быть завершена разработка конструкции установки с пиковой мощностью $(100—600) \cdot 10^{12}$ Вт при длительности импульса 1—10 мкс (энергия импульса 100 кДж).

5. Значения температуры плазмы и параметра удержания, полученные на установках разных типов, приведены на рис. 11.9. В течение последних 15 лет за каждое пятилетие параметр удержания увеличивался на порядок, а температура — в два раза. Из рис. 11.9 видно, что если темпы этого роста не снизятся, то можно ожидать, что до 1990 г. на «Токамаке» или какой-либо иной установке будет осуществлена управляемая термоядерная реакция.

Проблему создания энергетической термоядерной установки можно разделить на три стадии: а) создание управляемой установки с нулевым к. п. д., в которой выделяющаяся термоядерная энергия полезно используется только на поддержание самой реакции; б) создание установки с ненулевым к. п. д., в которой часть термоядерной энергии используется для получения электроэнергии; в) создание экономически рентабельной термоядерной электростанции. Осуществление управляемой реакции будет завершением первой стадии.

Проблема создания термоядерных энергетических установок наталкивается на большие трудности как физического, так и технического характера. Укажем четыре фундаментальные трудности. Первой является отмеченная выше физическая проблема устойчивости высокотемпературной плазмы. Вторая фундаментальная трудность является технической и состоит в том, что энергетические потери в плазме резко возрастают при наличии даже малых концентраций примесей атомов с большими атомными номерами Z . Уже десятые доли процента, скажем, вольфрама или молибдена делают невоз-

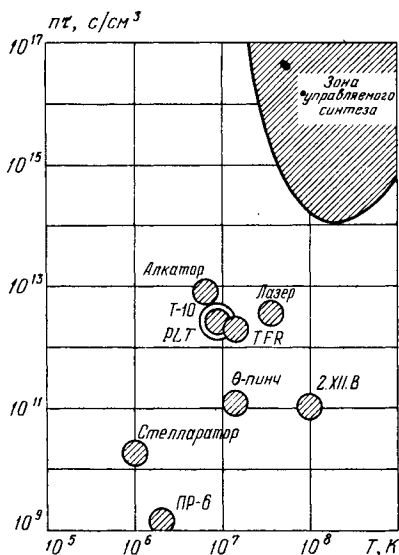


Рис. 11.9. Значения параметров $n\tau$ и T дейтерий-тритиевой плазмы, достигнутые на различных установках к 1979 г.

можным осуществление макроскопической термоядерной реакции. Поддержание высокой чистоты плазмы при термоядерных температурах является сложной комплексной технической проблемой. Третью фундаментальную трудность представляет «проблема первой стенки», ограничивающей плазму реактора. Под действием мощного потока нейтронов с энергией 14 МэВ будет происходить интенсивное повреждение (особенно охрупчивание) материала стенки. Четвертая фундаментальная трудность обусловлена тем, что требуемый для реакции тритий радиоактивен (с периодом полураспада 12,5 лет) и тем самым отсутствует в природе. Поэтому необходимо решить ядерно-физическую проблему воспроизводства трития. В качестве принципиального решения этой проблемы предполагается получение трития из лития под действием возникающих в реакции (11.1) нейтронов:



Особенно важной является реакция (11.42), которая интенсивно идет под действием быстрых ($E_n > 5$ МэВ) нейтронов и в которой воспроизводство трития идет без потери нейтронов. Конструктивное оформление этой идеи также наталкивается на большие трудности.

Только после решения этих и ряда других физико-технических проблем станет возможным сравнение технических и экономических показателей ядерных и термоядерных реакторов.

Создание термоядерных электростанций прогнозируется специалистами-термоядерщиками на начало следующего столетия.

§ 5. Энергетика будущего

1. Атомные электростанции, работающие на цепной реакции деления, уже сейчас вырабатывают энергию, стоимость которой сравнима со стоимостью энергии тепловых электростанций, а иногда и ниже. Быстрый технический прогресс в области строительства АЭС позволяет предсказать, что в ближайшее время атомная электроэнергия станет дешевле тепловой. И если в Англии АЭС строятся пока в районах, удаленных от других источников электроэнергии, то в США уже строят АЭС даже в непосредственной близости от угольных шахт. В ведущих странах мира атомная энергетика уже поставляет заметную (хотя и далеко не основную) часть вырабатываемой электроэнергии. Так, в странах Европейского экономического сообщества мощность АЭС за 1975 г. составила $18 \cdot 10^9$ Вт = 18 ГВт, а в США согласно прогнозам мощность АЭС к 1985 г. составит 300 ГВт. К концу нашего столетия на АЭС будет вырабатываться около 45% всей электроэнергии.

2. Мировое потребление электроэнергии сейчас составляет несколько миллиардов киловатт и быстро возрастает — примерно в два раза за каждые десять лет. Это естественно порождает вопрос о возможных источниках энергии. Уже перед первой мировой войной делались прогнозы, что существующих запасов нефти и угля хватит лишь на 50—80 лет, после чего наступит «энергетический голод». Действительность не оправдала этих прогнозов. Недра Земли оказались гораздо богаче, чем думали геологи. Так, до настоящего времени, несмотря на