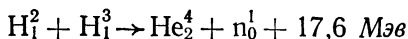


Атомная бомба по существу тоже представляет собой неуправляемый реактор на быстрых нейтронах. Взрыв осуществляется, когда две системы с подкритической массой соединяются (выстреливаются навстречу друг другу) и образуют систему с массой надкритической.

Недостатком всех реакторов является обилие радиоактивных отходов. В некоторых лабораториях отходы обмазывают специальной глиной и зарывают в землю, где нет грунтовых вод. Иногда погружают в контейнерах на дно океана. Было даже высказано предложение выпускать их за пределы атмосферы. Но так или иначе в перспективе использование ядерной энергии неминуемо должно привести к загрязнению радиоактивными отходами недр Земли и атмосферы. Кроме того, залежей урана, имеющегося на Земле (ориентировочно), хватит лишь на несколько сотен лет. Это является одной из причин, направляющих усилия физиков на поиски способов получения энергии за счет реакции синтеза легких ядер, принципиально иного способа извлечения ядерной энергии.

### § 43. ТЕРМОЯДЕРНЫЙ СИНТЕЗ

Зависимость средней энергии связи от массового числа  $\epsilon(A)$  (рис. 7) показывает, что энергия связи нуклона в наиболее легких ядрах, так же как и в наиболее тяжелых, меньше, чем в ядрах с промежуточными массовыми числами. Другими словами, сумма масс легких ядер, рассматриваемых самостоятельно, больше массы среднего ядра, образованного при их слиянии. Следовательно, соединение нескольких легких ядер в одно более тяжелое ядро должно также приводить к освобождению энергии, причем, как показывает крутизна подъема кривой, в таких реакциях синтеза должно выделиться существенно больше энергии на один нуклон, чем в реакции деления. Если при делении выделяется энергия порядка 1 *Мэв* на нуклон, то реакция синтеза, например реакция между дейтоном и тритием



идет с выделением энергии 3,5 *Мэв* на один нуклон.

Однако для того чтобы такую реакцию осуществить, необходимо сильно ускорить одно из ядер для преодоления сил кулоновского отталкивания ядер. Этот метод требует затраты большой энергии, часто превышающей ту энергию, которая освобождается при синтезе.

А главное, необходимо учесть, что подавляющая часть энергии дейтона расходуется на ионизацию и возбуждение атомов мишени. Эффективное сечение ядерной реакции примерно в  $10^8$  раз меньше эффективного сечения ионизации. Для того чтобы можно было использовать выделяющуюся энергию, надо создать такие условия, при которых энергии должно выделяться больше, чем ее

расходуется на возбуждение реакции, т. е. эти реакции должны быть *самоподдерживающимися*.

**Термоядерные реакции во Вселенной.** В 1929 г. Аткинсон и Хоутерманс высказали гипотезу о том, что условия для осуществления ядерного синтеза существуют внутри Солнца и других звезд и их излучение создается за счет термоядерных реакций, которые идут при огромных температурах в 15—30 млн. градусов. Какие условия требуются для поддержания термоядерных процессов?

Спектральный анализ светового излучения, испускаемого Солнцем, показал, что солнечная хромосфера в основном состоит из водорода и гелия. Эти прямые экспериментальные данные относятся, конечно, лишь к поверхностным слоям Солнца, так как электромагнитное излучение, возникающее в глубоких слоях, сильно трансформируется при прохождении поверхностных слоев и не дает информации о составе ядра Солнца.

Расчеты, основанные на предположении, что излучение из глубинных слоев имеет такой же характер, что и с поверхности, приводят к выводу, что температура в центре Солнца  $T_c \approx (10 \div 20)$  млн. град, плотность солнечной материи в центральной области  $\rho \approx 100 \text{ г/см}^3$  и, следовательно, расстояние между частицами меньше размеров атомов.

Отсюда следует, что вещество внутри звезд должно находиться полностью в ионизованном состоянии. Следовательно, вещество Солнца представляет собой плазму — электронно-ядерный газ, который под действием больших гравитационных сил достигает указанной выше высокой плотности.

Большое содержание водорода и гелия в хромосфере Солнца дало основание для предположения, что водород в звездах превращается в гелий. Образование ядер гелия из четырех ядер водорода сопровождается выделением большого количества энергии, достаточного, чтобы сохранились огромные температуры, при которых протекает синтез.

Оценим, какой должна быть кинетическая энергия ядер, чтобы одно ядро водорода могло преодолеть кулоновский потенциальный барьер другого. Высота кулоновского барьера равна энергии электрического поля, отталкивающего протоны, когда расстояние между ними равно радиусу действия ядерных сил:

$$E = \frac{Z_1 Z_2 e^2}{R} \approx \frac{22,6 \cdot 10^{-20}}{4 \cdot 10^{-13} \cdot 1,6 \cdot 10^{-6}} \approx 0,3 \text{ Мэв.}$$

Большинство ядер плазмы имеют энергии, близкие к средним энергиям теплового движения. При температуре  $10^4$  градусов средняя энергия частицы будет равна  $\bar{E} = \frac{3}{2} kT \approx 1 \text{ эв}$ .

Расстояние между ядрами существенно больше размеров ядер, поэтому к ним применимы основные положения кинетической тео-

рии газов, в частности, можно считать, что распределение их по энергии следует закону Максвелла (рис. 89). При температуре 20 млн. градусов средняя кинетическая энергия протонов составляет всего 0,002 Мэв.

Протоны такой энергии не могут преодолеть кулоновский потенциальный барьер. Однако здесь появляются два фактора, прин-

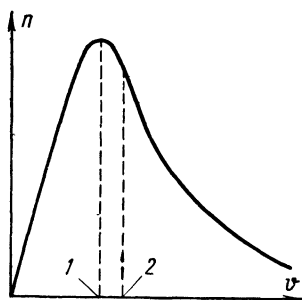


Рис. 89. Распределение частиц по скоростям (распределение Максвелла): 1 — наиболее вероятная скорость; 2 — средняя скорость

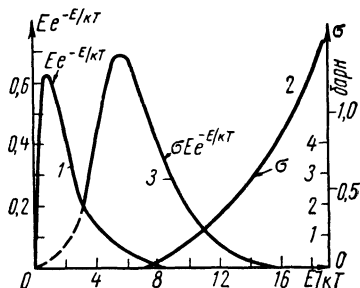


Рис. 90. Характеристики термоядерной реакции

ципально меняющие ситуацию в целом. С одной стороны, всегда имеется небольшая часть ядер с энергиями выше средней. С другой стороны, хотя частицы и имеют недостаточную среднюю энергию, согласно квантовой механике всегда существует небольшая вероятность просачивания их сквозь потенциальный барьер. Эта вероятность увеличивается с энергией.

Скорость протекания термоядерной реакции зависит от произведения числа ядер определенной энергии на вероятность того, что реакция возникает при этой энергии. Малая вероятность реакции компенсируется наличием огромного числа протонов. На кривой рис. 90 показано максвелловское распределение в потоке частиц<sup>1</sup> в зависимости от их энергии  $E$  при температуре  $T=20 \cdot 10^6$  градусов. Число частиц достигает максимума при  $E=kT$  и быстро убывает с дальнейшим ростом энергии. Зависимость эффективного сечения реакции от энергии частиц представлена кривой 2 (правая шкала ординат). В результате вклад ядер с разной энергией в общий выход термоядерной реакции, пропорциональный произведению  $\sigma E e^{E/kT}$  (кривая 3), оказывается оптимальным не при средней, а при более высокой энергии  $E \approx 10$  кэв и быстро убывает по обе стороны от этого максимума.

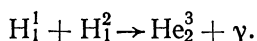
<sup>1</sup> Поток частиц, относительная энергия движения которых равна  $E$ , пропорционален  $E e^{-E/kT}$ .

Эти соображения позволяют объяснить процессы на Солнце тем, что внутри него при температурах, близких к 10 млн. градусов, протекает так называемый *водородный цикл*. Начинается он с того, что два протона объединяются и образуют дейтон:  $H_1^1 + H_1^1 \rightarrow H_2^2 + e^+ + \nu$ .

Возможность этой реакции следует из того, что хотя свободный протон не может распасться согласно уравнению  $p \rightarrow n + e^+ + \nu$  и дать нейтрон, необходимый для образования дейтона, в целом реакция объединения протонов дает достаточный избыток энергии (из-за выделяющейся энергии связи дейтона  $2,23 \text{ Мэв}$ ). Поэтому происходит своеобразный механизм  $\beta^+$ -распада «на лету». Затем уже протоны и нейтроны образуют  $H_2^2$ . Вероятность такого процесса очень мала, но тем не менее достаточна.

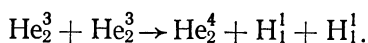
В теоретической астрофизике при описании термоядерных реакций обычно пользуются понятием *среднего времени жизни частицы* по отношению к той или иной реакции. Это время называют также временем реакции. Оно зависит от температуры и плотности вещества.

Время жизни протона относительно реакции объединения близко к 14 млрд. лет. После того как образовался дейтон, он практически мгновенно вступает во взаимодействие с водородом и идет реакция



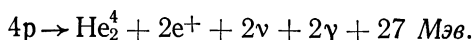
Среднее время жизни образовавшегося дейтона относительно этой реакции всего 6 сек.

После того как в звезде накопится достаточное количество легкого изотопа  $He_2^3$ , может осуществиться третья, последняя реакция водородного цикла:



Время этой реакции имеет порядок миллиона лет.

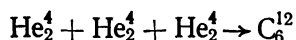
Цикл заканчивается образованием обычного ядра гелия и двух свободных протонов, которые могут дать начало новому циклу. Общий результат всех трех реакций можно выразить уравнением:



Можно считать, что водородный цикл является основным источником энергии на ранних стадиях развития звезды, поскольку он может протекать при относительно низких температурах  $\sim 10$  млн. градусов. При более высоких температурах, когда в звезде накопится заметное количество гелия, в результате присоединения новых нуклонов должно начаться образование элементов с большими атомными весами.

Однако в природе не существует стабильных ядер с массовыми числами  $A=5$  и  $A=8$  и поэтому столкновения между собой ядер гелия и водорода с гелием не могут привести к образованию более тяжелых ядер. Вероятность же множественных столкновений очень мала.

Например, образование углерода при тройном столкновении  $\alpha$ -частиц.



требует очень высоких температур ( $\sim 100$  млн. градусов). Вообще вопрос об образовании химических элементов при термоядерных реакциях является одним из актуальных и по существу еще нерешенных вопросов астрофизики. В частности, процесс образования  $\text{C}_6^{12}$  не обязательно должен быть тройным, а может протекать двухступенчато через промежуточное неустойчивое ядро  $\text{Be}^8$ .

При наличии в звезде углерода и при  $T > 15$  млн. градусов становится возможным также углеродно-азотный цикл (табл. 4).

Таблица 4

Реакция	Выделяемая энергия, Мэв	Среднее время реакции
$p + \text{C}_6^{12} \rightarrow \text{N}_7^{13} + \gamma$ . . . . .	1,95	$1,3 \cdot 10^7$ лет
$\text{N}_7^{13} \rightarrow \text{C}_6^{13} + e^+ + \gamma$ . . . . .	1,5+(0,72)	7,0 мин
$p + \text{C}_6^{13} \rightarrow \text{N}_7^{14} + \gamma$ . . . . .	7,54	$2,7 \cdot 10^6$ лет
$p + \text{N}_7^{14} \rightarrow \text{O}_8^{15} + \gamma$ . . . . .	7,35	$3,2 \cdot 10^8$ лет
$\text{O}_8^{15} \rightarrow \text{N}_7^{15} + e^+ + \gamma$ . . . . .	1,73+(0,98)	82 сек
$p + \text{N}_7^{15} \rightarrow \text{C}_6^{12} + \text{He}_2^4$ . . . . .	4,96	$1,1 \cdot 10^5$ лет
Итого: $4p \rightarrow \text{He}_2^4 + 2e^+ + \gamma + \nu$ . . . . .	25,03+(1,70)	

В скобках указана энергия, уносимая нейтрино. Видно, что результат всех этих реакций в конечном итоге тот же, что и при водородном цикле. Поведение ядра углерода в этом случае очень похоже на поведение катализаторов при химических реакциях, сохраняющихся после завершения цикла.

Скорости удельного энерговыделения углеродного и водородного циклов по-разному зависят от температуры. При относительно низких температурах ( $<15 \cdot 10^6$ ) преобладающее значение имеет протон-протонная цепь; по мере повышения температуры значение углеродного цикла быстро возрастает (рис. 91).

На Солнце и звездах, внутренняя температура которых близка к 15 млн. градусам, эти два процесса происходят примерно в равной степени.

В звездах-гигантах существенны так называемые гелиевый и неоновый циклы, протекающие при значительно более высоких температурах и плотностях.

Вычисления показывают, что при температуре Солнца процесс превращения 1 г водорода в гелий протекает в течение нескольких миллионов лет. Скорость удельного энерговыделения в типичных термоядерных реакциях по земным масштабам ничтожна. Так, 1 г солнечного вещества излучает в секунду энергию, равную одному эргу. Это гораздо меньше, например, скорости энерговыделения в живом организме в процессе обмена веществ. Однако вследствие огромной массы Солнца ( $2 \cdot 10^{33}$  г) полная излучаемая им мощность ( $4 \cdot 10^{26}$  вт) чрезвычайно велика. Хотя ежесекундно масса Солнца уменьшается на 4,3 млн. т, водорода, находящегося на Солнце достаточно, чтобы при неизменной скорости процесс выделения энергии шел в течение 30 млн. лет.

Благодаря огромным размерам и массам звезд удержание плазмы происходит за счет гравитационных сил. Термоизоляция осуществляется благодаря тому, что реакции синтеза протекают в горячем ядре звезды, а теплоотдача происходит с более холодной и весьма удаленной поверхности. Только поэтому звезды могут генерировать энергию в таких медленных процессах, как (p, p) и (CN) циклы. Для использования в земных условиях эти процессы совершенно непригодны, да и неосуществимы, например, реакция  $p + p \rightarrow D + e^+ + \nu$  непосредственно еще никем не наблюдалась.

**Термоядерные реакции в лабораторных условиях.** Возможность осуществления реакции синтеза и получения таким образом нового источника энергии для мирных целей представляет собой проблему, привлекающую огромное внимание ученых и инженеров. С конца 40-х годов работы в этом направлении проводятся во многих лабораториях мира. Термоядерные установки на реакциях синтеза D—D и D—T в случае их осуществления имели бы ряд преимуществ перед реакторами, основанными на делении тяжелых ядер.

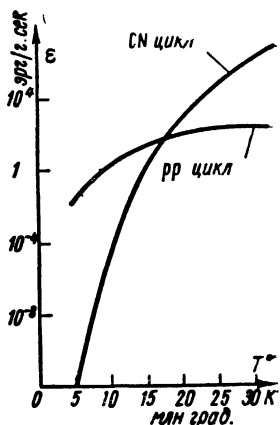
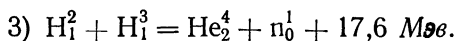
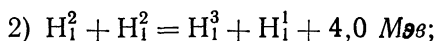
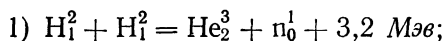


Рис. 91. Зависимость удельного выделения энергии углеродно-азотного и водородного циклов от температуры

Во-первых, существует практически неисчерпаемый источник дешевого горючего в виде дейтерия, находящегося в воде океанов. Во-вторых, при термоядерных реакциях не образуются радиоактивные ядра, как при реакции деления. Энергия, которую можно получить в результате образования 1 г гелия, равна примерно  $2 \cdot 10^5$  кв/час, т. е. в 10 раз больше, чем энергия, выделяющаяся при делении 1 г урана.

Однако реакции углеродного и водородного цикла идут слишком медленно, чтобы их практически можно было использовать. Поэтому важно овладеть другими ядерными реакциями с участием легких ядер. Наибольшие надежды, по-видимому, могут быть связаны с тремя реакциями, в которых участвуют изотопы водорода — дейтон и тритий:



Две первые реакции при одинаковой температуре идут примерно с равными скоростями; скорость третьей реакции при эквивалентных концентрациях примерно в 100 раз больше.

Сравнивая минимальные температуры, при которых реакции будут самоподдерживающимися, нужно учитывать также энергию, теряемую за счет излучения, выхода нейтронов и др. Расчеты показали, что минимальная температура, при которой реакции  $\text{H}_1^2 + \text{H}_1^2$  поддерживаются без вмешательства извне, равна примерно 350 млн. градусам для реакций  $\text{H}_1^2 + \text{H}_1^3$  она ниже, но тем не менее составляет примерно 60 млн. градусов.

При решении проблемы синтеза возникает также вопрос о том, какой должна быть концентрация газа (число ядер плазмы в  $1 \text{ см}^3$ ). Предел возможной концентрации газа, очевидно, находится по величине максимального давления, которое могут выдержать стенки термоядерного реактора. Если, например, принять  $n = 10^{15}$  частиц/см<sup>3</sup>, то давление  $p$  будет равно:

$$p = nkT \approx 10^{15} \cdot 10^{-16} \cdot 10^8 = 10^7 = 10 \text{ атмосфер}.$$

Следовательно, надо брать разреженный газ (в воздухе  $n = 3 \cdot 10^{19}$  частиц/см<sup>3</sup>).

Итак, перед физиками и инженерами стоят задачи: получить высокие температуры ( $10^8$  градусов) и удержать разогретую плазму в течение длительного времени в заданном объеме (мы не касаемся здесь вопроса отвода энергии — решение этой проблемы имеет свои тоже немалые трудности).

Прежде всего необходимо разрешить вопрос о том, какие стенки могут удерживать плазму с температурой в миллионы градусов. Любое вещество при этих температурах не только испаряется,

но и полностью ионизируется. Единственный путь решения проблемы — создание магнитных барьеров, препятствующих утечке нагретой плазмы из рабочего объема. Как это следует из законов движения зарядов в магнитных полях, достаточно сильное поле, силовые линии которого окружают плазму, создает как бы «магнитную стенку», удерживая плазму от расширения [15].

Идея теплоизоляции плазмы магнитным полем была высказана в 1950 г. А. Д. Сахаровым и И. Е. Таммом в СССР; одновременно аналогичные идеи были выдвинуты в Англии и США.

Для удержания плазмы применяются магнитные ловушки и тороидальные разряды с продольным магнитным полем. В магнитных ловушках плазма удерживается внешним магнитным полем специфической (иногда довольно сложной) конфигурации.

В системах с плазменными шнурами определяющую роль в удержании плазмы играет самостягивание плазмы магнитным полем протекающего по ней тока. Этот эффект носит название *пинч-эффект* (эффект сжатия). Остановимся на нем несколько подробнее. При пропускании через плазму мощных импульсов электрического тока благодаря сжатию вещества электродинамическими силами должен образоваться плазменный столб, оторванный от стенок разрядной трубки. В таком процессе электрический ток выполняет несколько функций: в начальной стадии создает плазму благодаря процессу ионизации; с помощью электродинамических сил удерживает плазму в сжатом состоянии; за счет выделения джоулева тепла нагревает плазму до высокой температуры.

В своей простейшей форме это явление наблюдается при исследовании электрических разрядов с большой силой тока в прямых разрядных трубках. Ток, текущий по такому газообразному проводнику, окружен кольцевыми силовыми линиями магнитного поля. Взаимодействие тока с его собственным магнитным полем создает силу, сжимающую разрядный столб. На рис. 92, *a* схематически изображен эффект такого сжатия плазмы. Если группа заряженных частиц движется в одном направлении, то в поверхностном слое плазменного шнура радиуса  $r$  возникает магнитное поле, равное

$$H = \frac{1}{c} \cdot \frac{2I}{r},$$

где  $I$  — сила тока.

Это магнитное поле действует на  $1 \text{ см}^2$  поверхности шнура с силой  $f$ , равной

$$f = \frac{H}{8\pi} = \frac{1}{c^2} \cdot \frac{I^2}{2\pi r^2},$$

и стремится сжать плазменный шнур.

Поскольку действие сил магнитного поля приводит к адиабатическому сжатию плазмы, то возникает разогрев ее, причем соответственно возрастает и давление плазмы.



В конечном счете при некотором значении радиуса плазменного шнура  $a$  устанавливается равновесие между силой сжатия магнитного поля и внутренним давлением плазмы  $p_0$ , которое отвечает условию

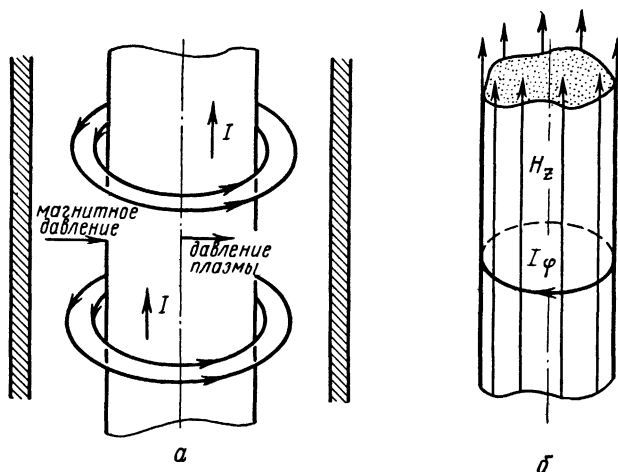


Рис. 92. Схематическое изображение эффекта сжатия плазменного шнура: *а* — в случае продольного тока; *б* — в случае кольцевого тока

$$f = \frac{H_0^2}{8\pi} = \frac{1}{c^2} \cdot \frac{I_0^2}{2\pi a^2} = p_0 = (n_{оя} + n_{ое}) kT,$$

где  $n_{оя}$  и  $n_{ое}$  соответственно концентрации ядер и электронов в плазме.

Отсюда равновесное магнитное поле

$$H_0 = \sqrt{8\pi p_0},$$

а равновесная сила разрядного тока

$$I_0 = ac \sqrt{2\pi (n_{оя} + n_{ое}) kT}.$$

Например, в шнуре дейтериевой плазмы с равновесной плотностью  $n_{оя} = n_{ое} = 3 \cdot 10^{14}$  частиц/см<sup>3</sup> при диаметре 20 см и температуре 200 млн. градусов должен протекать ток около 1 Ма. Соответствующее значение равновесной напряженности магнитного поля на поверхности шнура будет составлять около 20 тысяч эрстед.

Характерной особенностью пинч-эффекта является неустойчивость плазменного шнура, которая приводит к разрушению его за время порядка нескольких тысячных долей секунды. Эта неустой-

чивость проявляется в образовании перетяжек и утолщений, придающих плазменному шнуру характерную структуру (рис. 93, а).

Другой формой неустойчивости является стремление шнура к изгибанию (рис. 93, б). При ничтожном боковом смещении плотность магнитных силовых линий внутри изгиба оказывается больше, чем снаружи, и поэтому магнитное давление стремится увеличить деформацию, а не выпрямить шнур. Таким образом, случайно появившаяся неоднородность ведет к неустойчивости. Это случай абсолютной неустойчивости.

Описанный выше пинч-эффект называется линейным. Кроме того, существует так называемый  $\theta$ -пинч-эффект, возникающий при быстром сжатии плазмы нарастающим во времени продольным внешним магнитным полем (рис. 92, б). Под действием магнитного давления, равного

$\frac{H^2}{8\pi}$  может идти такой же бы-

стрый процесс сжатия, как и при кратковременных импульсных разрядах. В случаях с линейным пинч-эффектом сила сжатия появляется благодаря взаимодействию азимутального магнитного поля с продольным током, а при  $\theta$ -пинче продольное поле взаимодействует с азимутальными токами.

В системах с  $\theta$ -пинчем удается также достигнуть очень быстрого сжатия плазмы и повышения ее температуры до миллионов градусов. В обоих случаях может наблюдаться жесткое излучение, обусловленное различным видом неустойчивостей.

Одним из путей устранения неустойчивости является создание установок, в которых разрядная камера имеет тороидальную форму. Ток в газе, заполняющем камеру, возбуждается индукционным путем. Для стабилизации плазменного витка используется продольное магнитное поле, которое создается с помощью обмотки, навитой на внешнюю поверхность камеры. Экспериментальные установки такого типа были разработаны и используются в Советском Союзе. Они образуют в настоящее время целое семейство, получившее условное название «Токомак».

Пока еще трудно сказать, каковы перспективы работы в этом направлении и какая максимальная температура будет достигнута при нагревании плазмы током. Остается также нерешенным вопрос об устойчивости плазменного витка. До сих пор в устройствах

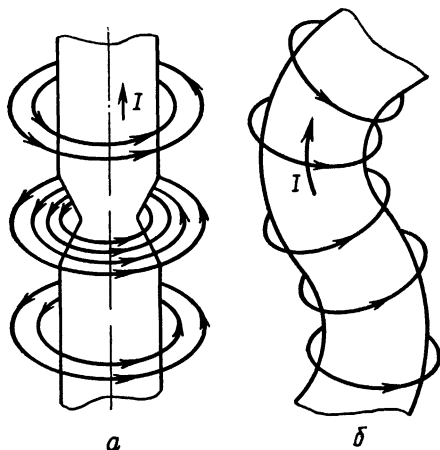


Рис. 93. Виды неустойчивости плазменного шнура

описываемого типа удавалось нагревать плазму до температур 2—3 млн. градусов при концентрации плазмы порядка  $(1—2) \times 10^{13}$  частиц/см<sup>3</sup>.

Применение магнитных ловушек с комбинированными магнитными полями также является перспективным для достижения эффективной термсиоляции плазмы. В системах такого типа пока что удается устойчиво удерживать плазму с относительно небольшой концентрацией ( $n$  не больше  $(1—2) \cdot 10^{10}$  частиц/см<sup>3</sup>), и неизвестно, можно ли в будущем длительно сохранять в ловушках плазму большой плотности.

Пока еще трудно сказать, когда будет решена задача получения управляемых термоядерных реакций, так как поведение плазм, нагретой до температур порядка десятков миллионов градусов в магнитных полях в сотни килоэрстед, еще очень мало изучено как теоретически, так и экспериментально. Интенсивная работа, которая проводится в этой области в различных лабораториях, связанная с сооружением дорогих уникальных установок и решением очень сложных технических задач, представляется чрезвычайно важной, так как ее успешное решение сулит переворот в энергетике и практически безграничное расширение энергетических ресурсов на Земле.