

## 2. ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ЯДЕРНОГО СИНТЕЗА

### 2.1 Термодинамика ядерного синтеза

То, что ядерные реакции синтеза могут давать высокий энергетический выигрыш понятно не только из астрономических данных. Достаточно взглянуть на график зависимости энергии связи от массового числа, А. График имеет максимум при  $A \approx 60$ . Очевидно, что выделением энергии будут сопровождаться реакции синтеза легких ядер и реакции деления тяжелых ядер. Причем характер графика показывает, что синтез может дать немного больший энергетический выход, чем реакция деления.

Простейшее ядро - ядро атома водорода, состоит из одного протона. Энергию, которая заключена в этом ядре, легко подсчитать по формуле Эйнштейна  $E=mc^2$ . Масса протона  $m_p=1,76 \cdot 10^{-27}$  кг, скорость света  $c=3 \cdot 10^8$  м/с. Отсюда получаем  $E=1,5 \cdot 10^{-10}$  Дж или 938 МэВ. Это очень большая энергия. При нормальных условиях в одном кубическом метре водорода содержится  $5,4 \cdot 10^{25}$  протонов, так что полная энергия, которую содержит 1 м<sup>3</sup> водорода равна  $8,1 \cdot 10^{15}$  Дж или  $2,25 \cdot 10^9$  кВт\*ч. Это число можно сравнить разве что с выработкой электроэнергии в нашей стране за день. 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 взаимоуничтожение, а выделяемая при этом энергия полностью переходит в энергию  $\gamma$ - квантов:  $p + \bar{p} \rightarrow \gamma + \gamma$ . Гамма- кванты можно поглотить в толстом слое вещества и выделившееся тепло использовать для производства электроэнергии. Увы! У нас нет больших количеств антипротонов. Придется пока подождать с практической реализацией данного способа получения энергии.

Возможно выделение энергии в реакции слияния легких ядер:  $M(Z_1, A_1) + M(Z_2, A_2) = M(Z, A) + \Delta E/c^2$ . Подобный процесс называется синтезом. Для получения энергии методом ядерного синтеза пригодны любые ядра от водорода до железа. Обычно в реакциях синтеза образуется несколько ядер. В результате освобождается энергия в форме кинетической энергии продуктов синтеза.

Если бы удалось объединить тяжёлые изотопы водорода - тритий и дейтерий - в реакции  ${}^2_1H + {}^3_1H \rightarrow {}^4_2He + {}^1_0n$ , то выделилось бы 17,6 МэВ энергии. Приращение массы покоя частиц, участвующих в реакции  $\Delta Mc^2 = -\Delta E$ ,  $\Delta E=17,6$  МэВ. Около 80% выделяющейся энергии уносят нейтроны, а остальные -  $\alpha$ -частицы с энергией 3,6 МэВ. При равных весовых количествах реагирующих веществ в реакции синтеза дейтерия и трития выделяется в четыре раза больше энергии, чем при делении ядра атома урана.

Трудности осуществления реакции синтеза процесса связаны с тем, что силы электростатического отталкивания между положительно заряженными ядрами препятствуют их сближению. Для сближения изотопов водорода на расстояние  $r \sim 10^{-12}$  см необходимо затратить энергию  $ke^2/r \sim 0,15$  МэВ, что существенно меньше энергии, получаемой в результате синтеза. Поэтому эта реакция энергетически выгодна, хотя провести ее не просто. В нормальных условиях кинетическая энергия ядер легких атомов слишком мала для того, чтобы, преодолев электростатическое отталкивание, они могли сблизиться и вступить в ядерную реакцию. Однако отталкивание можно преодолеть «грубой» силой, например, сталкивая ядра, обладающие высокой относительной скоростью.

Средняя энергия связи нуклона в ядре  $E_{св}/A$  растёт с ростом от  $A$  до  $A \approx 50 - 60$ . Поэтому, когда образуется среднее или лёгкое ядро при слиянии более лёгких ядер, должна освобождаться энергия, поскольку в новом ядре нуклоны сильнее связаны, чем в исходных ядрах. Особенно велико должно быть выделение энергии при синтезе лёгких ядер, так как величина  $E_{св}/A$  при малых  $A$  растёт очень быстро. Так, при образовании ядра гелия из ядер дейтерия и трития,

выделяется энергия:  $28,3 - (8,5 + 2,2) = 17,6$  МэВ. В расчёте на один нуклон, участвующий в реакции, получается  $\frac{17,6}{5} \approx 3,5$  МэВ. Таким образом, при полном преобразовании 1 кг смеси дейтерия и

третия в гелий выделяется в 4 раза больше энергии, чем при полном распаде 1 кг урана.

Как показал Г.Гамов, вероятность реакции между двумя сближающимися легкими ядрами пропорциональна  $e^{-\frac{KZ_1Z_2}{\sqrt{W}}}$ , где  $Z_1$  и  $Z_2$  – числа протонов во взаимодействующих ядрах,  $W$  – энергия их относительного сближения, а  $K$  – постоянный множитель. Энергия, необходимая для осуществления реакции, зависит от числа протонов в каждом ядре. Если оно больше трех, то эта энергия слишком велика и реакция практически неосуществима. Таким образом, с возрастанием  $Z_1$  и  $Z_2$  вероятность реакции уменьшается.

Вероятность того, что два ядра вступают во взаимодействие, характеризуется «сечением реакции», измеряемом в барнах ( $1 \text{ б} = 10^{-24} \text{ см}^2$ ). Сечение реакции – это площадь эффективного поперечного сечения ядра, в которое должно «попасть» другое ядро, чтобы произошло их взаимодействие. Сечение реакции дейтерия с тритием достигает максимальной величины (5 б), когда взаимодействующие частицы имеют энергию относительного сближения порядка 200 кэВ. При энергии 20 кэВ сечение становится меньше 0,1 б.

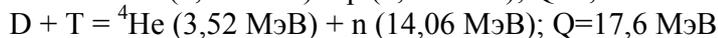
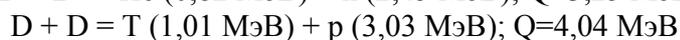
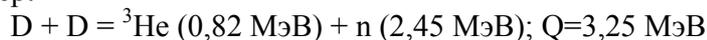
Из миллиона попадающих на мишень ускоренных частиц не более одной вступает в ядерное взаимодействие. Остальные рассеивают свою энергию на электронах атомов мишени и замедляются до скоростей, при которых реакция становится невозможной. Следовательно, способ бомбардировки твердой мишени ускоренными ядрами для УТС непригоден, так как получаемая при этом энергия намного меньше затраченной.

При нагреве смеси реагирующих ядер до очень высоких температур кинетическая энергия теплового движения ядер становится достаточно высокой для осуществления реакции ядерного синтеза, получивших название термоядерных реакций.

Термоядерные реакции – реакции слияния (синтеза) легких атомных ядер в более тяжелые, происходящие при очень высоких температурах (порядка десятков миллионов градусов и выше). **Ядерный синтез**, термоядерный синтез - реакция слияния легких атомных ядер в более тяжелые ядра, происходящая при сверхвысокой температуре и сопровождающаяся выделением огромных количеств энергии. Ядерный синтез – это реакция, обратная делению атомов: в последней энергия выделяется за счет расщепления тяжелых ядер на более легкие.

## 2.2 Реакции ядерного синтеза

В термоядерных реакторах используется энергия, выделяющаяся при слиянии легких атомных ядер. Например:



Известны и другие термоядерные реакции, например реакции слияния ядер протия с тритием или с дейтерием  ${}^4\text{He}$  с  ${}^7\text{Li}$  или  ${}^9\text{Be}$ , которые также являются экзотермическими (Табл.4). Реакция слияния ядер трития и дейтерия является наиболее перспективной для осуществления управляемого термоядерного синтеза, так как ее сечение даже при низких энергиях достаточно велико.

**Табл.4** Энергетические характеристики термоядерных реакций.

Реакция*	Энерго-выделение, МэВ	$\sigma_{\text{макс}}$ , барн (в области энергии <1 МэВ)	Энергия налетающей частицы, МэВ, отвечающая $\sigma_{\text{макс}}$
$p + p \rightarrow D + e^+ + \nu$	2,2	$10^{-23}$	-
$p + D \rightarrow \text{He}^3 + \gamma$	5,5	$10^{-6}$	-
$D + D \rightarrow T + p$	4,0	0,16 (при 2 МэВ)	2,0
$D + D \rightarrow \text{He}^3 + p$	3,3	0,09	1,0
$D + T \rightarrow \text{He}^3 + n$	17,6	5	0,10

$D + T \rightarrow He^4 + n$	17,6	5	0,15
$T + T \rightarrow He^4 + n$	11,3	0,10	1,0
$D + He^3 \rightarrow He^4 + p$	18,3	0,80	0,45
$n + Li^6 \rightarrow He^4 + T$	4,8	закон $\sigma \sim 1/v$	-
$p + Li^7 \rightarrow 2He^4$	17,3	$10^{-3}$	0,25
$D + Li^6 \rightarrow D + 2He^4$	22,4	0,026	0,60

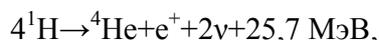
\*Во всех приведенных реакциях налетающей частицей является первая слева.

Вследствие большого сечения рассеяния при бомбардировке ядер трития ускоренными дейтонами энергетический баланс процесса термоядерного синтеза по D – T реакции может быть отрицательным, т.е. на ускорение дейтонов затрачивается больше энергии, чем выделяется при синтезе. Положительный энергетический баланс возможен только в том случае, если бомбардирующие частицы после упругого столкновения будут способны вновь участвовать в реакции. Для преодоления электрического отталкивания атомные ядра должны обладать большой кинетической энергией. Эти условия могут быть созданы в высокотемпературной плазме (плазмой называют газ, в котором атомы или молекулы находятся полностью ионизированном состоянии). D – T – реакция начинает протекать только при температуре около  $5 \cdot 10^7$  К. Лишь при этой температуре выделяется больше энергии на единицу объема и в единицу времени, чем затрачивается.

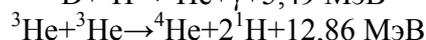
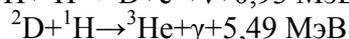
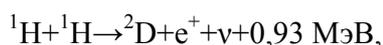
### 2.3 Термоядерные топлива

Реакции с участием протонов, играющие основную роль в процессах ядерного синтеза на Солнце и других гомогенных звездах, в земных условиях не представляют практического интереса, поскольку имеют слишком малое сечение.

**H-H – реакция.** Казалось бы, самой перспективной является следующая реакция ядерного синтеза:



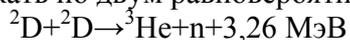
в которой реагирует обычный водород (протий), а образуется  $\alpha$ -частица, позитроны и выделяется тепло. И хотя на один атом гелия тут тепла выделяется в 7,5 раз меньше, чем на один атом урана при делении его ядра, но масса атома гелия в 59 раз меньше массы атома урана. Поэтому "калорийность" водородного "топлива" в пересчете на килограмм вещества почти в 8 раз выше, чем уранового. Да и запасов водорода в природе столько, что если бы удалось этот процесс в земных условиях в управляемом режиме, то энергетическая проблема была бы навсегда решена. Увы! Подобной реакции в природе не существует. Она написана как сумма трех последовательных ядерных реакций:

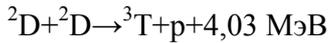


Эту группу реакций называют водородным циклом и предполагают, что по такой цепочке реакций происходит превращение водорода в гелий в недрах большинства звезд, в том числе и Солнца. Первую из этих ядерных реакций в земных условиях никто никогда не наблюдал, даже на ускорителях со встречными пучками протонов. Но поскольку в природном водороде всегда имеются примеси дейтерия  $^2D$ , то такая реакция в звездах все-таки идет. Других путей для появления дейтерия в природе теоретики не видят.

**D-D – реакция.** В любом природном соединении водорода на 6800 атомов протия  $^1H$  приходится один атом дейтерия  $^2D$  (это 0,015%). Дейтерий считается надеждой человечества в решении энергетической проблемы. Ведь технология выделения тяжелой (дейтериевой) воды из обычной достаточно хорошо отработана, а потому добыча дейтерия - не проблема, хоть и дорогое удовольствие. Его запасы в водах мирового океана практически безграничны.

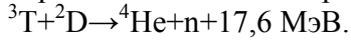
D-D – реакцию можно считать практически осуществимой на Земле. Эта реакция может протекать по двум равновероятным каналам:





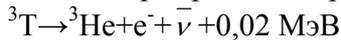
в результате которой начнется энерговыделение.

Во второй из этих реакций получается, правда, тритий,  ${}^3\text{T}$ , а не гелий, но и тритий пригодится: его ядра довольно активно реагируют с ядрами дейтерия:



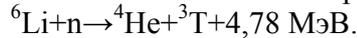
Оказалось, что последнюю реакцию наиболее легко зажечь в земных условиях (требуется нагреть смесь дейтерия с тритием "всего" до 100 миллионов градусов). Поэтому она и была осуществлена еще в начале 50-х годов в водородной бомбе. Чтобы создать необходимую температуру, "запалом" для водородной бомбы служит атомная бомба. Но маломощную атомную бомбу, которая не разворотила бы всё термоядерное устройство, придумать пока не удастся из-за наличия у нее критической массы. Поэтому при проектировании установок, в которых хотят осуществить реакцию для управляемого термоядерного синтеза с целью получения тепла и выработки с его помощью электроэнергии, обходятся без атомной бомбы, а стараются разогреть дейтерий-тритиевую плазму до термоядерных температур электрическими разрядами. Пока, как известно, из этого ничего не получается. Если с нагревом до требуемых температур уже имеется какой-то прогресс, то с удержанием плазмы в реакторе пока встает проблема за проблемой.

**D-T- реакция.** Реакция синтеза дейтерия и трития обладает относительно большим сечением и обеспечивает удельную теплотворную способность  $3.5\cdot 10^{11}$  Дж/г. Если осуществлять термоядерный синтез по D-T- реакции, то нужен тритий. А природных запасов его не существует, так как ядра трития со временем распадаются по реакции



с периодом полураспада всего 12,6 лет.

Тритий можно нарабатывать, облучая литий-6 потоками нейтронов от ядерного реактора:



При этом не только образуется тритий, но и выделяется энергия.

В будущем предполагают получать необходимые потоки нейтронов уже не от ядерных реакторов с ураном, а от термоядерных, то есть производить тритий там же, где он будет использоваться. Если окружить термоядерную камеру слоем  ${}^6\text{Li}$  (в природном литии его содержится 7%), то можно осуществить полное воспроизводство расходуемого трития. И хотя на практике часть нейтронов неизбежно теряется, их потерю легко восполнить, вводя в оболочку такой элемент, как бериллий, ядро которого, при попадании в него одного быстрого нейтрона, испускает два.

Таким образом, сырьем для термоядерных реакторов становится литий. Вся энергетика Земли, переведенная на электроэнергию от термоядерных электростанций, потребует до десяти тысяч тонн лития в год. Мировые запасы лития составляют  $7.3\cdot 10^6$  т, но в относительно богатых рудах разведанных месторождений составляют не более одного миллиона тонн (распространенность лития примерно равна распространенности урана). Значит, легкодоступного лития хватит лишь на 200 лет. Но литий нужен еще и для производства аккумуляторов, для металлургии, керамическим производствам. Поэтому запасов лития хватит не более чем на 100 лет. Запасы дейтерия в морской воде практически неисчерпаемы, но выделять его оттуда – дело дорогое.

**D- ${}^3\text{He}$ -реакция.** Реакция



может быть использована для создания малорадиоактивного термоядерного реактора. В D- ${}^3\text{He}$  - реакции основную энергию несут заряженные продукты реакции, а нейтроны возникают лишь в D-D и в D-T реакциях при выгорании рождающегося в D-D реакциях трития. Важно, что можно уменьшить в 50 раз его выход. В результате биологическая опасность термоядерного реактора может быть снижена на четыре-пять порядков величины по сравнению с ядерными реакторами

деления, отпадет необходимость промышленной обработки радиоактивных материалов и их транспортировки, качественно упрощается захоронение радиоактивных отходов.

Правда, для осуществления этой экологически чистой реакции нужны температуры в 8 раз большие, чем для D-T – реакции, но это не слишком серьезная проблема. Проблема в том, где взять необходимый гелий-3. На Земле и обыкновенного  $^4\text{He}$  не так уж много, а изотопа  $^3\text{He}$  в нем содержится всего лишь  $1,3 \cdot 10^{-4} \%$ ! Считается, что в разведанных недрах Земли его содержится не более 300 кг. Сейчас во всем мире для исследовательских целей накоплено всего несколько десятков килограммов гелия-3. Большие запасы  $^3\text{He}$  имеются на Луне. В образцах лунного грунта обнаружено от 7 до 36 г  $^3\text{He}$  на тонну грунта (в поверхностном слое лунного реголита содержание гелия-3 на три-четыре порядка превышает содержание гелия на Земле). Это больше, чем содержание золота в богатых его месторождениях на Земле. В будущем на Луне будут организованы поселки для добычи гелия-3 и отправки его космическими контейнерами на Землю. В принципе, современный уровень ракетной техники это позволяет. Показано, что полет одного аппарата типа "Шаттл" обеспечит полугодовое потребление электроэнергии на Земле.

Для преодоления кулоновского расталкивания сливающихся ядер необходимо нагревать плазму до температур -100 млн. градусов для D-T реакции и - 500 млн. для D- $^3\text{He}$  реакции. Такие высокие температуры снижают перспективы D- $^3\text{He}$ . Скорее всего, на практике сначала будет реализована D-T – реакция, а уже потом, когда речь пойдет об использовании УТС в энергетике, перейдут на D- $^3\text{He}$  – реакцию. Поскольку на одну реакцию синтеза D-T приходится около  $10^5$  обычных столкновений ядер, проблема термоядерного синтеза состоит в решении двух задач: нагрева вещества до необходимых температур и его удержания на время, достаточное для "сжигания" заметной части термоядерного топлива. Это время определяется критерием Лоусона.

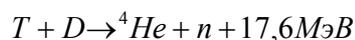
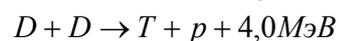
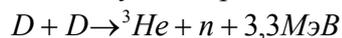
### 3. ТЕРМОЯДЕРНЫЙ СИНТЕЗ В ЗЕМНЫХ УСЛОВИЯХ

В настоящее время в земных условиях реакция термоядерного синтеза осуществляется двумя способами:

- 1) Взрыв водородной бомбы;
- 2) Облучение дейтерида лития тепловыми нейтронами.

#### 3.1 Водородная бомба

Водородная бомба состоит из взрывателя, обеспечивающего температуру до нескольких миллионов градусов (обычно используется атомная бомба), и дейтерида лития-6. При высокой температуре с этими ядрами происходят следующие реакции:



Высокая температура при взрыве атомной бомбы сохраняется только в течении нескольких миллионных долей секунды. Поэтому исходные вещества должны иметь максимальную плотность. Скорость выделения энергии при этих условиях очень велика  $10^{17}$  Дж за  $10^{-5}$  с или  $10^{23}$  Вт.

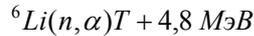
Для практического использования в качестве источника энергии термоядерное оружие не годится. Ведь мощность самых крупных из существующих сейчас электростанций не превышает  $10^{10}$  Вт. Скорость реакций в промышленном термоядерном реакторе должна быть существенно больше, чем на Солнце, и столь же существенно меньше, чем в водородной бомбе.

#### 3.2 Термоядерный синтез в медленном реакторе

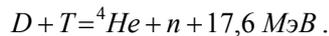
Взрыв водородной бомбы (или другого типа термоядерного процесса) – неуправляемый термоядерный синтез, что делает его непригодным для энергетических целей. Между тем в лабораторных условиях управляемый термоядерный синтез осуществить достаточно просто. Для этого достаточно опустить в канал любого медленно реактора, работающего на реакции деления

урана, ампулу с дейтеридом лития. При этом никаких высоких температур не потребуется – интересующий процесс пойдет и при комнатной температуре. То, что в ампуле идет ядерная реакция между дейтерием и тритием, мы немедленно обнаружим по появлению высокоэнергетичных нейтронов (энергия нейтронов 14 МэВ).

Действительно, если используемый литий обогащен стабильным изотопом  ${}^6\text{Li}$  (можно использовать и природный литий, поскольку в нем содержится 7%  ${}^6\text{Li}$ ), то под действием тепловых нейтронов атомного реактора пойдет следующая ядерная реакция:



В результате этой реакции, возникают «горячие» атомы трития. Энергии атома отдачи трития (порядка 3 МэВ) вполне достаточно для протекания реакции взаимодействия трития с находящимся в дейтериде лития дейтерием:



Сейчас рассматриваются перспективы этого процесса с точки зрения использования его в реакции деления (гибридные реакторы) или для уничтожения некоторых опасных актинидов.

Для энергетических же целей этот метод не годится: затраты энергии на процесс превышают выделяющуюся энергию. Поэтому приходится искать другие варианты осуществления управляемого термоядерного синтеза, варианты, обеспечивающие большой энергетический выигрыш.

## 4. ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ ТЕРМОЯДЕРНОГО РЕАКТОРА

Реакция слияния легких ядер, цель которой – получение полезной энергии, называется управляемым термоядерным синтезом. Осуществляется он при температурах порядка сотен миллионов кельвинов. Такой процесс реализован пока только в лабораториях.

### 4.1 Временные и температурные условия

*Управляемый термоядерный синтез - научная проблема осуществления синтеза легких ядер с целью производства энергии. Проблема может быть решена в плазме при температуре выше  $10^8 \text{ К}$  и выполнения Лоусона критерия ( $n\tau > 10^{14} \text{ с/см}^3$ , где  $n$  - плотность высокотемпературной плазмы,  $\tau$  - время удержания ее в системе).*

*Лоусона критерий (1957 г.), условие возникновения термоядерной реакции  $n\tau \geq 10^{14} \text{ см}^{-3}\text{с}$ , где  $\tau$  - время удержания высокотемпературной плазмы в системе,  $n$  – плотность ее частиц. При выполнении Лоусона критерия энергия, выделяющаяся при управляемом термоядерном синтезе, превышает энергию, вводимую в систему.*

Получение полезной термоядерной энергии возможно лишь при выполнении двух условий. Во-первых, предназначенная для синтеза смесь должна быть нагрета до температуры, при которой кинетическая энергия ядер обеспечивает высокую вероятность их слияния при столкновении. Во-вторых, реагирующая смесь должна быть очень хорошо термоизолирована (т.е. высокая температура должна поддерживаться достаточно долго, чтобы произошло необходимое число реакций и выделившаяся за счет этого энергия превышала энергию, затраченную на нагрев топлива).

В количественной форме это условие выражается следующим образом. Чтобы нагреть термоядерную смесь, одному кубическому сантиметру ее объема надо сообщить энергию  $E_1 = knT$ , где  $k$  – численный коэффициент,  $n$  – плотность смеси (количество ядер в  $1 \text{ см}^3$ ),  $T$  – требуемая температура. Для поддержания реакции сообщенная термоядерной смеси энергия должна сохраняться в течение времени  $\tau$ . Чтобы реактор был энергетически выгоден, нужно, чтобы за это время в нем выделилось термоядерной энергии больше, чем было потрачено на нагрев. Выделившаяся энергия (также на  $1 \text{ см}^3$ ) выражается следующим образом:

$$E_2 = n^2 R f(T) \tau,$$

где  $f(T)$  – коэффициент, зависящий от температуры смеси и ее состава,  $R$  – энергия, выделяющаяся в одном элементарном акте синтеза. Тогда условие энергетической рентабельности  $E_2 > E_1$  примет вид

$$n^2 > (k/R)[T/f(T)]$$

или

$$n\tau > (k/R)[T/f(T)].$$

Последнее неравенство, известное под названием критерия Лоусона, представляет собой количественное выражение требований к совершенству термоизоляции. Правая часть – «число Лоусона» – зависит только от температуры и состава смеси, и чем оно больше, тем жестче требования к термоизоляции, т.е. тем труднее создать реактор. В области приемлемых температур число Лоусона для чистого дейтерия составляет  $10^{16}$  с/см<sup>3</sup>, а для равнокомпонентной DT-смеси –  $2 \cdot 10^{14}$  с/см<sup>3</sup>. Таким образом, DT-смесь является более предпочтительным термоядерным топливом.

В соответствии с критерием Лоусона, определяющим энергетически выгодную величину произведения плотности на время удержания, в термоядерном реакторе следует использовать по возможности большие  $n$  либо  $\tau$ . Поэтому исследования УТС разошлись по двум разным направлениям: в первом исследователи пытались с помощью магнитного поля в течение достаточно длительного времени удерживать относительно разреженную плазму; во втором – с помощью лазеров на короткое время создать плазму с очень высокой плотностью.

Термоядерные исследования развивались (и развиваются) по двум направлениям. В первом, получившем название **магнитного удержания**, плазму помещают в магнитное поле. В идеальном случае магнитное удержание позволяет осуществить стационарное выделение термоядерной мощности – наиболее привлекательный режим энергетических реакторов. Во втором направлении – **инерционном удержании** – порцию термоядерного топлива импульсно нагревают до температур – 30-50 млн. градусов, и ос-частицы начинающихся реакций синтеза увеличивают нагрев плазмы, если выполняется условие их торможения в топливе:  $n\tau > 0.3$  г/см<sup>3</sup> ( $n$  – плотность топлива,  $\tau$  – размер). Численно это условие совпадает с критерием Лоусона. Выделение энергии носит взрывообразный характер и происходит за время, меньшее времени теплового разлета вещества, определяемого его инерцией. Взрыв термоядерной бомбы доказал принципиальную осуществимость инерционного удержания плазмы. Для энергетики важно определить наименьшую массу топлива, чтобы рассматривать схемы реакторов с повторяющимися взрывами. Уже в начале исследований было ясно, что мощность импульсных источников энергии, обеспечивающих сжатие и последующий микровзрыв, должна быть очень большой ( $>10^{14}$  Вт). Это обстоятельство, а также подобие физики микровзрыва и взрыва бомбы обусловили более поздний старт исследований по инерционному удержанию плазмы.

#### 4.2 Магнитное удержание плазмы

Во время реакции синтеза плотность горячего реагента должна оставаться на уровне, который обеспечивал бы достаточно высокий выход полезной энергии на единицу объема при давлении, которое в состоянии выдержать камера с плазмой. Например, для смеси дейтерий – тритий при температуре  $10^8$  К выход определяется выражением

$$E = 2,5 \cdot 10^{-28} n^2 \text{ Вт/см}^3.$$

Если принять  $E$  равным  $100$  Вт/см<sup>3</sup> (что примерно соответствует энергии, выделяемой топливными элементами в ядерных реакторах деления), то плотность  $n$  должна составлять  $10^{15}$  ядер/см<sup>3</sup>, а соответствующее давление  $nT$  –  $3$  МПа. Время удержания при этом, согласно критерию Лоусона, должно быть не менее  $0,1$  с. Для дейтерий-дейтериевой плазмы при температуре  $10^9$  К

$$E = 8 \cdot 10^{-30} n^2 \text{ Вт/см}^3.$$

В этом случае при  $E = 100$  Вт/см<sup>3</sup>,  $n = 3 \cdot 10^{15}$  ядер/см<sup>3</sup> и давлении примерно  $100$  МПа требуемое время удержания составит более  $1$  с. Заметим, что указанные плотности составляют лишь  $0,0001$  от плотности атмосферного воздуха, так что камера реактора должна откачиваться до высокого вакуума.

Приведенные выше оценки времени удержания, температуры и плотности являются типичными минимальными параметрами, необходимыми для работы термоядерного реактора,

причем легче они достигаются в случае дейтерий-третиевой смеси. Что касается термоядерных реакций, протекающих при взрыве водородной бомбы и в недрах звезд, то следует иметь в виду, что в силу совершенно иных условий в первом случае они протекают очень быстро, а во втором – крайне медленно по сравнению с процессами в термоядерном реакторе.

#### 4.2.1 Плазма

Термоядерные реакции протекают при высоких температурах. Настолько высоких, что любое вещество переходит в четвертое состояние – состояние плазмы. Не вдаваясь сейчас в подробности получения плазмы, коротко остановимся на ее свойствах.

*Плазма (от греч. - вылепленное, оформленное), частично или полностью ионизованный газ, в котором плотности положительных и отрицательных зарядов практически одинаковы.*

Термин плазма в физике введён в 1923 американским учёными И. Ленгмюром и Л. Тонксом, проводившими зондовые измерения параметров низкотемпературной газоразрядной плазмы. Кинетика плазмы рассматривалась в работах Л. Д. Ландау в 1936 и 1946 и А. А. Власова в 1938. В 1942 Х. Альфвен предложил уравнения магнитной гидродинамики для объяснения ряда явлений в космической плазме. В 1950 И. Е. Тамм и А. Д. Сахаров, а также американский физик Л. Спигер предложили идею магнитной термоизоляции плазмы для осуществления УТС. В 50-70-е гг. 20 в. изучение плазмы стимулировалось различными практическими применениями плазмы, развитием астрофизики и космофизики и физики верхней атмосферы Земли - особенно в связи с полётами космических летательных аппаратов, а также интенсификацией исследований по проблеме УТС.

При достаточно сильном нагревании любое вещество испаряется, превращаясь в газ. Если увеличивать температуру и дальше, резко усилится процесс термической ионизации, т. е. молекулы газа начнут распадаться на составляющие их атомы, которые затем превращаются в ионы и свободные электроны. При температурах более миллиона градусов газ, состоящий из легких элементов, полностью ионизуется, т.е. каждый его атом утрачивает все свои электроны. Ионизация газа, кроме того, может быть вызвана его взаимодействием с электромагнитным излучением (фотоионизация) или бомбардировкой газа заряженными частицами. Свободные заряженные частицы - особенно электроны - легко перемещаются под действием электрического поля. Поэтому в состоянии равновесия пространственные заряды входящих в состав плазмы отрицательных электронов и положительных ионов должны компенсировать друг друга так, чтобы полное поле внутри плазмы было равно нулю. Отсюда вытекает необходимость практически точного равенства плотностей электронов и ионов в плазме - её "квазинейтральности". Нарушение квазинейтральности в объёме, занимаемом плазмой, ведёт к немедленному появлению сильных электрических полей пространственных зарядов, тут же восстанавливающих квазинейтральность. Степенью ионизации плазмы называется отношение числа ионизованных атомов к полному их числу в единице объёма плазмы. В зависимости от величины  $\alpha$  говорят о слабо, сильно и полностью ионизованной плазме.

Средние энергии различных типов частиц, составляющих плазмы, могут отличаться одна от другой. В таком случае плазму нельзя охарактеризовать одним значением температуры и различают электронную температуру  $T_e$ , ионную температуру  $T_i$ , (или ионные температуры, если в плазме имеются ионы нескольких сортов) и температуру нейтральных атомов  $T_a$  (нейтральной компоненты). Подобная плазма называется неизотермической, в то время как плазма, для которой температуры всех компонент равны, называется изотермической. Применительно к плазме несколько необычный смысл (по сравнению с другими разделами физики) вкладывается в понятия "низкотемпературная" и "высокотемпературная". Низкотемпературной принято считать плазму с  $T_i = 10^5$  К, а высокотемпературной - плазмой с  $T_i = 10^6 - 10^8$  К и более. Это условное деление связано как с возможностью для плазмы достигать чрезвычайно больших температур, так и с особой важностью высокотемпературной плазмы в связи с проблемой осуществления УТС.

В состоянии плазмы находится подавляющая часть вещества Вселенной - звёзды, звёздные атмосферы, туманности галактические и межзвёздная среда. Около Земли плазма существует в

космосе в виде солнечного ветра, заполняет магнитосферу Земли (образуя радиационные пояса Земли) и ионосферу. Процессами в околоземной плазме обусловлены магнитные бури, полярные сияния. Отражение радиоволн от ионосферной плазмы обеспечивает возможность дальней радиосвязи на Земле. В лабораторных условиях и промышленных применениях плазмы образуется в электрическом разряде в газах (дуговом разряде, искровом разряде, тлеющем разряде и пр.), в процессах горения и взрыва, используется в плазменных ускорителях, магнитогидродинамических генераторах и во многих др. устройствах. Высокотемпературную плазму получают в установках для исследования возможных путей осуществления УТС. Многими характерными для плазмы свойствами обладают совокупности электронов проводимости и дырок в полупроводниках и электронов проводимости (нейтрализуемых неподвижными положительными ионами) в металлах, которые поэтому называются плазмой твёрдых тел. Её отличительная особенность - возможность существования при сверхнизких для "газовой" плазмы температурах - комнатной и ниже, вплоть до абсолютного нуля температуры.

Возможные значения плотности плазмы  $n$  (число электронов или ионов в  $\text{см}^3$ ) расположены в очень широком диапазоне: от  $n \sim 10^{-6}$  в межгалактическом пространстве и  $n \sim 10$  в солнечном ветре до  $n \sim 10^{22}$  для твёрдых тел и ещё больших значений в центральных областях звёзд.

В резком отличии свойств плазмы от свойств нейтральных газов определяющую роль играют два фактора. Во-первых, взаимодействие частиц плазмы между собой характеризуется кулоновскими силами притяжения и отталкивания, убывающими с расстоянием гораздо медленнее (т. е. значительно более "дальнодействующими"), чем силы взаимодействия нейтральных частиц. По этой причине взаимодействие частиц в плазме является, строго говоря, не "парным", а "коллективным" - одновременно взаимодействует друг с другом большое число частиц. Во-вторых, электрические и магнитные поля очень сильно действуют на плазму (в то время как они весьма слабо действуют на нейтральные газы), вызывая появление в плазме объёмных зарядов и токов и обуславливая целый ряд специфических свойств плазмы. Эти отличия позволяют рассматривать плазму как особое, четвёртое состояние вещества.

Плазма называется идеальной, если потенциальная энергия взаимодействия частиц мала по сравнению с их тепловой энергией. (Плазма молнии относится к слабонеидеальной). Помимо хаотического теплового движения, частицы плазмы могут участвовать в упорядоченных "коллективных процессах", из которых наиболее характерны продольные колебания пространственного заряда, называемые ленгмюровскими волнами. Их угловая частота называется плазменной частотой. Многочисленность и разнообразие коллективных процессов, отличающие плазмы от нейтрального газа, обусловлены "дальностью" кулоновского взаимодействия частиц плазмы, благодаря чему плазму можно рассматривать как упругую среду, в которой легко возбуждаются и распространяются различные шумы, колебания и волны.

В магнитном поле с индукцией  $B$  на частицы плазмы действует Лоренца сила; в результате этого заряженные частицы плазмы вращаются с циклотронными частотами по ларморовским спиралям (кружкам). В таком взаимодействии проявляется диамагнетизм плазмы: создаваемые электронами и ионами круговые токи уменьшают внешнее магнитное поле; при этом электроны вращаются по часовой стрелке, а ионы - против неё. В неоднородном поле на круговые токи действует сила, стремящаяся вытолкнуть частицу плазмы из области сильного поля в область более слабого поля, что является важнейшей причиной неустойчивости плазмы в неоднородных полях.

Если в плазме не возбуждены какие-либо интенсивные колебания и неустойчивости, то именно столкновения частиц определяют её так называемые диссипативные свойства - электропроводность, вязкость, теплопроводность и диффузию. Плазма очень хорошо проводит электрический ток, очень велика и теплопроводность плазмы. Плазму можно нагревать, пропуская через нее электрический ток. В полностью ионизованной плазме электропроводность не зависит от плотности плазмы и пропорциональна  $T^{3/2}$ ; при высоких температурах плазму можно рассматривать как идеальный проводник. Если такая плазма движется в магнитном поле, то эдс

при обходе любого замкнутого контура, движущегося вместе с плазмой, равна нулю, что по закону Фарадея для индукции электромагнитной приводит к постоянству магнитного потока, пронизывающего контур. Эта "приклеенность", или "вмороженность", магнитного поля также относится к важнейшим свойствам плазмы. Ею обусловлена, в частности, возможность самовозбуждения (генерации) магнитного поля за счёт увеличения длины магнитных силовых линий при хаотическом турбулентном движении среды. Например, в космических туманностях часто видна волокнистая структура, свидетельствующая о наличии возбуждённого таким образом магнитного поля.

В разреженной плазме, где можно пренебречь столкновениями, заряженная частица летит вдоль магнитной силовой линии, быстро вращаясь по ларморовской спирали. При наличии возмущающей силы частица также медленно "дрейфует" в направлении, перпендикулярном как магнитному полю, так и направлению этой силы. Например, в электрическом поле, направленном под углом к магнитному, происходит "электрический дрейф". Если же электрическое поле отсутствует, но магнитное поле неоднородно, то имеет место "центробежный дрейф" в направлении бинормали к силовой линии, а в продольном направлении диамагнитная сила тормозит частицу, приближающуюся к области более сильного магнитного поля. При этом остаются неизменными полная энергия частицы и её магнитный момент. Таково, например, движение в магнитном поле Земли космических частиц, которые отражаются от полярных областей, где поле сильнее, и вместе с тем дрейфуют вокруг Земли (ионы - на запад, электроны - на восток). Поле Земли является магнитной ловушкой: оно удерживает захваченные им частицы в радиационных поясах. Аналогичными свойствами удержания плазмы обладают зеркальные магнитные ловушки, применяемые в исследованиях по УТС.

При описании плазмы с помощью уравнений магнитной гидродинамики она рассматривается как сплошная среда, в которой могут протекать токи. Взаимодействие этих токов с магнитным полем создаёт объёмные электродинамические силы, которые должны уравновешивать газодинамическое давление плазмы, аналогичное давлению в нейтральном газе. В состоянии равновесия магнитные силовые линии и линии тока должны проходить по поверхностям постоянного давления. Если поле не проникает в плазму (модель "идеального" проводника), то такой поверхностью является сама граница плазмы, и на ней газодинамическое давление должно равно внешнему магнитному давлению.

Простейший пример такого равновесия – **Z-пинч**, возникающий при разряде между двумя электродами. Равновесие зет-пинча неустойчиво - на нём легко образуются желобки, идущие вдоль магнитного поля. При последующем развитии они превращаются в тонкие перетяжки и могут приводить к обрыву тока. В мощных разрядах с токами  $10^6$  а в дейтериевой плазме такой процесс сопровождается некоторым числом ядерных реакций и испусканием нейтронов, а также жёстких рентгеновских лучей, что впервые было обнаружено в 1952 Л. А. Арцимовичем и М. А. Леонтовичем. Если внутри пинча создать продольное магнитное поле, то, двигаясь из-за "вмороженности" вместе с плазмой, оно своим давлением будет препятствовать развитию перетяжек. Желобки и в этом случае могут возникать вдоль винтовых силовых линии полного магнитного поля, складывающегося из продольного поля и поперечного поля, которое создаётся самим током плазмы. Это имеет место, например, в так называемом равновесном тороидальном пинче. Однако, если отношение напряженностей параллельного к перпендикулярному полю больше отношения большого и малого радиуса тора шаг винтовых силовых линий полного поля оказывается больше длины замкнутого плазменного шнура и желобковая неустойчивость не развивается. Такие системы, называются **токамаками**, используются для исследований по проблеме УТС.

При наличии магнитного поля в однородной плазме возможны волны шести типов: три высокочастотные и три низкочастотные. Если температура или плотность плазмы в магнитном поле неоднородны, то возможны ещё так называемые "дрейфовые" волны. При больших амплитудах возможны "бесстолкновительные" ударные волны (наблюдаемые на границе

магнитосферы), уединённые волны (солитоны), а также ряд др. "нелинейных" волн и, наконец, сильноразвитая турбулентность движения плазмы. В неравновесной плазме при определённых условиях возможна "раскачка неустойчивостей", т. е. нарастание какого-либо из перечисленных типов волн до некоторого уровня насыщения. Возможны и более сложные случаи индуцированного возбуждения волн одного типа за счёт энергии волн другого типа.

Спектр излучения низкотемпературной (например, газоразрядной) плазмы состоит из отдельных спектральных линий. В газосветных трубках, применяемых, в частности, для целей рекламы и освещения (лампы "дневного света"), наряду с ионизацией происходит и обратный процесс - рекомбинация ионов и электронов, дающая так называемое рекомбинационное излучение со спектром в виде широких полос. Для высокотемпературной плазмы со значительной степенью ионизации характерно тормозное излучение с непрерывным спектром, возникающее при столкновениях электронов с ионами. В магнитном поле ларморовское вращение электронов плазмы приводит к появлению магнитотормозного излучения на гармониках циклотронной частоты, особенно существенного при больших (релятивистских) энергиях электронов. Важную роль в космической плазме играет вынужденное излучение типа обратного Комптона эффекта. Им, а также магнито-тормозным механизмом обусловлено излучение некоторых космических туманностей, например Крабовидной. Корпускулярным излучением плазмы называются быстрые частицы, вылетающие из неравновесной плазмы в результате развития различных типов неустойчивостей. В первую очередь в плазме раскачиваются какие-либо характерные колебания, энергия которых затем передаётся небольшой группе "резонансных" частиц. Этим механизмом объясняется ускорение не очень энергичных космических частиц в атмосфере Солнца и в туманностях, образующихся при вспышках сверхновых звёзд типа пульсара в Крабовидной туманности.

Высокотемпературная плазма ( $T \sim 10^8$  К) из дейтерия и трития - основной объект исследований по УТС. Такая плазма создаётся путём нагрева и быстрого сжатия плазмы током (используется также высокочастотный подогрев) либо путём инъекции высокоэнергичных нейтральных атомов в магнитное поле, где они ионизируются, либо облучением мишени мощными лазерами или релятивистскими электронными пучками. Низкотемпературная плазма ( $T \sim 10^3$  К) находит применение в газоразрядных источниках света и в газовых лазерах, в термоэлектронных преобразователях тепловой энергии в электрическую и в магнитогидродинамических (МГД) генераторах, где струя плазмы тормозится в канале с поперечным магнитным полем, что приводит к появлению между верхним и нижним электродами электрического поля; напряжение с электродов подаётся во внешнюю цепь. Если "обратить" МГД-генератор, пропуская через плазму, в магнитном поле ток из внешнего источника, образуется плазменный двигатель, весьма перспективный для длительных космических полётов. Плазматроны, создающие струи плотной низкотемпературной плазмы, широко применяются в различных областях техники. В частности, с их помощью режут и сваривают металлы, наносят покрытия, бурят скважины. В плазмохимии низкотемпературную плазму используют для получения некоторых химических соединений, например галогенидов инертных газов. Высокие температуры плазмы приводят к высокой скорости протекания химических реакций - как прямых реакций синтеза, так и обратных реакций разложения. Если производить синтез "на пролёте" плазменной струи, расширяя и тем самым быстро охлаждая её на следующем участке (такая операция называется "закалкой"), то можно затруднить обратные реакции разложения и существенно повысить выход требуемого продукта.

#### 4.2.2 Плазма и УТС

Чтобы удержать плазму, например, при температуре  $10^8$  К, её нужно надёжно термоизолировать. В принципе изолировать плазму от стенок камеры можно, поместив её в сильное магнитное поле. Это обеспечивается силами, которые возникают при взаимодействии токов с магнитным полем в плазме.

Под действием магнитного поля ионы и электроны движутся по спиралям вдоль его силовых линий. Переход с одной силовой линии на другую возможен при столкновениях частиц и

при наложении поперечного электрического поля. В отсутствие электрических полей высокотемпературная разреженная плазма, в которой столкновения происходят редко, будет лишь медленно диффундировать поперек магнитных силовых линий. Если силовые линии магнитного поля замкнуть, придав им форму петли, то частицы плазмы будут двигаться вдоль этих линий, удерживаясь в области петли. Кроме такой замкнутой магнитной конфигурации для удержания плазмы были предложены и открытые системы (с силовыми линиями поля, выходящими из торцов камеры наружу), в которых частицы остаются внутри камеры благодаря ограничивающим движению частиц магнитным «пробкам». Магнитные пробки создаются у торцов камеры, где в результате постепенного увеличения напряженности поля образуется сужающийся пучок силовых линий.

На практике осуществить магнитное удержание плазмы достаточно большой плотности оказалось далеко не просто: в ней часто возникают магнитогидродинамические и кинетические неустойчивости.

Магнитогидродинамические неустойчивости связаны с изгибами и изломами магнитных силовых линий. В этом случае плазма может начать перемещаться поперек магнитного поля в виде сгустков, за несколько миллионных долей секунды уйдет из зоны удержания и отдаст тепло стенкам камеры. Такие неустойчивости можно подавить, придав магнитному полю определенную конфигурацию.

Кинетические неустойчивости очень многообразны и изучены они менее детально. Среди них есть такие, которые срывают упорядоченные процессы, как, например, протекание через плазму постоянного электрического тока или потока частиц. Другие кинетические неустойчивости вызывают более высокую скорость поперечной диффузии плазмы в магнитном поле, чем предсказываемая теорией столкновений для спокойной плазмы.

#### **4.2.3 Системы с замкнутой магнитной конфигурацией**

Если к ионизованному проводящему газу приложить сильное электрическое поле, то в нем возникнет разрядный ток, одновременно с которым появится окружающее его магнитное поле. Взаимодействие магнитного поля с током приведет к появлению действующих на заряженные частицы газа сжимающих сил. Если ток протекает вдоль оси проводящего плазменного шнура, то возникающие радиальные силы подобно резиновым жгутам сжимают шнур, отодвигая границу плазмы от стенок содержащей ее камеры. Это явление, теоретически предсказанное У.Беннеттом в 1934 и впервые экспериментально продемонстрированное А.Уэром в 1951, названо **пинч-эффектом**.

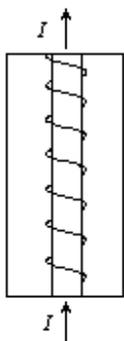
Известно, что один из наиболее существенных механизмов силового действия тока на проводник (например, металл) связан со взаимодействием тока с порождаемым им магнитным полем (пинч-эффект). Механизм образования упругих напряжений при пинч-эффекте состоит в следующем. Электрический ток в проводнике приводит к возникновению в нем магнитного поля, которое действует с силой Лоренца на вызвавший это поле дрейфующий электронный газ. Независимо от направления тока такая сила самодействия всегда направлена к центру проводника перпендикулярно направлению тока. В результате электронный газ сжимается к центру проводника, образуя отрицательный объемный электрический заряд, а у поверхности проводника, где концентрация электронов понижается, формируется положительный заряд (при этом полный заряд проводника остается равным нулю). Вследствие такой поляризации в проводнике образуется поперечное к току электрическое поле (поле Холла), которое, действуя с силой Кулона на ионную решетку, приводит к ее упругому сжатию с образованием механических напряжений.

***Пинч – эффект** (англ. "ципок", "толчок) - сжатие сильноточного газового разряда в результате взаимодействия тока разряда с собственным или внешним магнитным полем. В плазменных установках под пинч-эффектом понимают сжатие плазмы под действием протекающего в нем тока.*

Суть эффекта заключается в том, что во время прохождения линейного заряда вокруг него возникают электрические кольцевые токи, обладающие периодическим сжимающим действием. Они как бы "прищипывают" ствол проводника (например, молнии), разрывая его на множество

"бусинок-четок". Силы тут большие. Известно, что иногда после ударов молнии в громоотвод, сделанный из металлической трубы, можно видеть, как эта труба превращается в более тонкий, но сплошной металлический стержень. Поэтому пинч-эффект используется в технологических процессах, в частности для направленной деформации металлов.

Пинч-эффект проявляется при достаточно больших силах тока. В простейшей форме это явление наблюдается при исследовании электрических разрядов с большой силой тока в прямых разрядных трубках. Ток, текущий по такому газообразному проводнику (ионизированному газу) окружает себя кольцевыми силовыми линиями магнитного поля. Взаимодействие тока с его собственным магнитным полем создает силу, сжимающую разрядный столб. В результате такого сжатия разряд сжимается в узкий шнур (Рис. 9).



**Рис. 9** Сужение плазмы в плазменный шнур

Пинч-эффект появляется в токовом канале, например в цилиндре, заполненном проводящей средой. Электрическое поле приложено к противоположным концам цилиндра и действует по его оси. Силовые линии магнитного поля имеют вид концентрических окружностей, плоскости которых перпендикулярны к оси цилиндра. Сила направлена к оси цилиндра и стремится сжать проводящую среду. Пинч-эффект имеет место в твердотельной плазме (при равной концентрации носителей заряда противоположных знаков) и в низкотемпературной плазме.

Метод пинча применяется для удержания плазмы; примечательной его особенностью является то, что газ нагревается до высоких температур самим электрическим током (омический нагрев). Принципиальная простота метода обусловила его использование в первых же попытках удержания горячей плазмы. Помимо диффузии плазмы в радиальном направлении, наблюдается еще продольный дрейф и выход ее через торцы плазменного шнура. Потери через торцы можно устранить, если придать камере с плазмой форму бублика (тора). В этом случае получается **тороидальный пинч**.

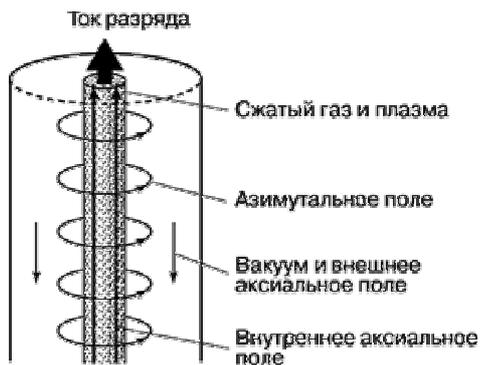
Для простого пинча серьезной проблемой являются присущие ему магнитогидродинамические неустойчивости. Дело в том, что при пинч-эффекте появляется не только поперечное сжатие шнура плазмы магнитным полем, но и возникает ряд новых эффектов. Например, взаимодействие стягивает одноименные токи в сгустки, разрывая плазму, а из-за разделения зарядов возникают плазменные колебания.

Если у плазменного шнура возникает небольшой изгиб, то плотность силовых линий магнитного поля с внутренней стороны изгиба увеличивается (Рис. 10). Магнитные силовые линии, которые ведут себя подобно сопротивляющимся сжатию жгутам, начнут быстро «выпучиваться», так что изгиб будет увеличиваться вплоть до разрушения всей структуры плазменного шнура. В результате плазма вступит в контакт со стенками камеры и охладится.



**Рис.10** Неустойчивый плазменный шнур. Силовые линии магнитного поля сгущаются с вогнутой стороны, усиливая изгиб.

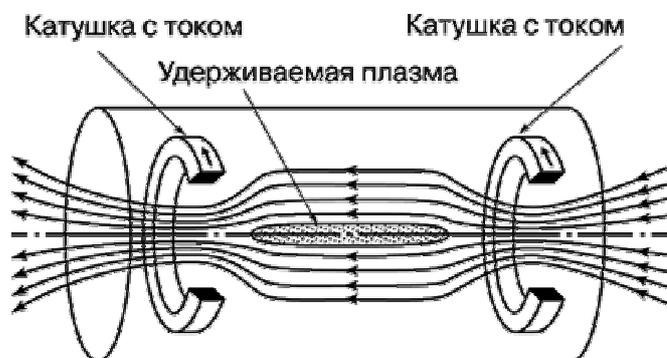
Чтобы исключить это губительное явление, до пропускания основного аксиального тока в камере создают продольное магнитное поле, которое вместе с приложенным позднее круговым полем «выпрямляет» зарождающийся изгиб плазменного шнура (Рис. 11). Принцип стабилизации плазменного шнура аксиальным полем положен в основу двух перспективных проектов термоядерных реакторов – токамака и пинча с обращенным магнитным полем.



**Рис.11.** Схема стабилизации плазменного шнура магнитным полем (Плазменный шнур можно защитить от неустойчивости изгиба аксиальными полями, создаваемыми внутри и снаружи токонесящего шнура).

#### 4.2.4 Открытые магнитные конфигурации.

В системах открытой конфигурации проблема удержания плазмы в продольном направлении решается путем создания магнитного поля, силовые линии которого вблизи торцов камеры имеют вид сужающегося пучка. Заряженные частицы движутся по винтовым линиям вдоль силовой линии поля и отражаются от областей с более высокой напряженностью (где плотность силовых линий больше). Такие конфигурации (**Рис. 12**) называются ловушками с магнитными пробками, или магнитными зеркалами. Магнитное поле создается двумя параллельными катушками, в которых протекают сильные одинаково направленные токи. В пространстве между катушками силовые линии образуют «бочку», в



которой и располагается удерживаемая плазма. Однако экспериментально установлено, что такие системы вряд ли в состоянии удержать плазму той степени плотности, которая необходима для работы реактора.

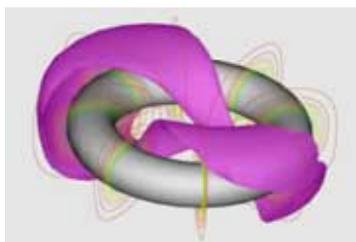
**Рис.12** Классическая магнитная ловушка плазмы с катушками, которые создают поле, отражающее частицы к центру камеры реактора и таким образом удерживающее плазму в ограниченном пространстве.

## 5. УСТАНОВКИ С МАГНИТНЫМ УДЕРЖАНИЕМ

Одной из первых и самых простых попыток реализовать идею магнитного удержания является **Z-пинч** - плазменный шнур между двумя электродами, ток в котором создает азимутальное магнитное поле, призванное сжимать и удерживать плазму.

**Z-пинч** («зет-пинч») - сжатие, возникающее при разряде между двумя электродами.

В 1958 г. были опубликованы результаты расчета нестационарного режима сжатия цилиндрического плазменного шнура с током, включенного в электрическую цепь, в одномерной модели. В последующие годы выполнены более глубокие исследования Z-пинча. В частности, была решена задача о сжатии шнура в одномерной двухтемпературной модели. Развитием идеи Z-пинча явились замкнутые тороидальные установки **токамак** и **стелларатор**: шнур, изогнутый в тор, избавлен от прямого контакта горячей плазмы с электродами, а хорошо изученные неустойчивости пинча преодолеваются усложнением структуры поля с помощью дополнительных внешних токов, окружающих тор. Расчеты МГД-равновесия и устойчивости плазмы в токамаках и стеллараторах, которые внесли существенный вклад в предсказание операционных пределов экспериментальных установок, стали основой для интеграции технических и плазменно-физических моделей термоядерного реактора (**Рис. 13**).

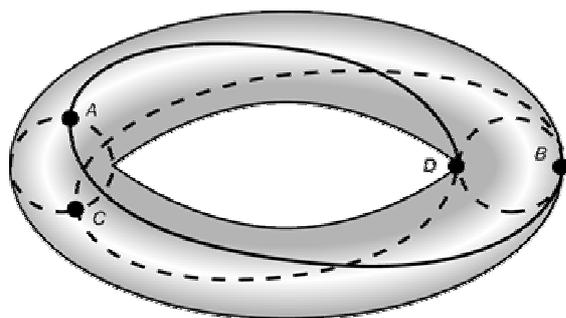


**Рис. 13.** Магнитные поверхности в равновесной плазменной конфигурации

Магнитные методы удержания плазмы в установках УТС используются в России, США, Японии и ряде европейских стран. Главное внимание уделяется установкам тороидального типа, таким, как токамак и пинч с

обращенным магнитным полем, появившимся в результате развития более простых пинчей со стабилизирующим продольным магнитным полем.

Для удержания плазмы при помощи тороидального магнитного поля необходимо создать условия, при которых плазма не смещалась бы к стенкам тора. Это достигается «скручиванием» силовых линий магнитного поля (т.н. «вращательным преобразованием»). Такое скручивание осуществляется двумя способами. В первом способе через плазму пропускается ток, приводящий к конфигурации устойчивого пинча. Возникает конфигурация, известная под названием токамак (аббревиатура выражения «ТОроидальная КАмера с МАгнитными КАтушками»).



**14)** был разработан под руководством Л.А.Арцимовича в Институте атомной энергии им. И.В.Курчатова в Москве.

**Рис.14** Тороидальное поле стелларатора или токамака. Частицы, многократно обегая пространство внутри тора вдоль магнитной силовой линии, описывают тороидальную поверхность и тем самым не позволяют скапливаться электрическим зарядам. Типичная траектория частицы – ADCBA.

Во втором способе для обеспечения равновесия удерживаемой плазмы применяются специальные винтовые обмотки вокруг тороидальной плазменной камеры. Токи в этих обмотках создают сложное магнитное поле, приводящее к закручиванию силовых линий суммарного поля внутри тора. Такая установка, называемая **стелларатором**, была разработана в Принстонском университете (США) Л.Спитцером.

### 5.1 Токамак

В установках типа токамак плазму создают внутри тороидальной камеры с помощью безэлектродного кольцевого разряда. С этой целью в плазменном сгустке создают электрический ток, и при этом, как у всякого тока, у него появлялось собственное магнитное поле - сгусток плазмы как бы сам становится магнитом. Теперь с помощью внешнего магнитного поля определенной конфигурации можно подвесить плазменное облако в центре камеры, не позволяя ему соприкоснуться со стенками.

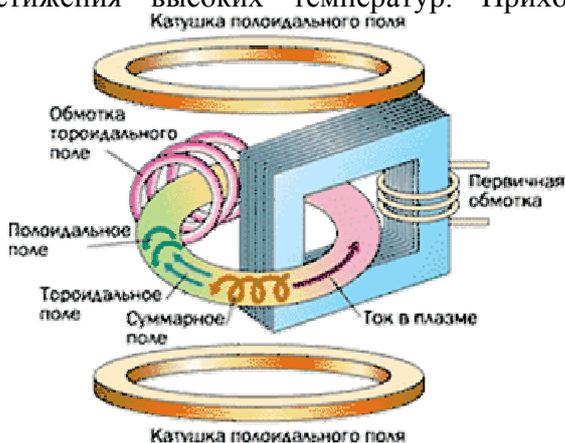
В токамаке, в сущности, заложен принцип трансформатора. Разреженная смесь дейтерия и трития (смесь должна быть сильно разреженной, чтобы исключить большие давления при миллионной температуре) помещается в тороидальную трубку. Трубка в свою очередь помещается в сильное магнитное поле. В трубке создается сильное вихревое электрическое поле (как в мощном понижающем трансформаторе), которое вызывает в газе ток порядка миллиона ампер. Магнитное поле, удерживающее плазму, создается как за счет тока, протекающего через обмотку вокруг камеры, так и за счет тока, индуцированного в плазме. Для получения более устойчивой плазмы используется внешнее продольное магнитное поле.

Вакуумная камера в форме тора заполнена смесью изотопов водорода и свободных электронов. Она охватывает стальной сердечник, играя роль вторичной обмотки трансформатора (**Рис.15**). На первичную обмотку подается переменное напряжение, индуцирующее в камере электрический ток - движение электронов. Сталкиваясь с атомами, электроны высокой энергии ионизируют их - сила тока возрастает. В камере возникает плазма. На камеру надеты обмотки тороидального поля, которое сжимает плазму в шнур. Поле катушек удерживает плазменный шнур в центре камеры, не давая ему коснуться стенок.

Камера в токамаке - тороидальная, то есть по форме напоминает бублик (**Рис.16**). Из камеры откачивают воздух, чтобы посторонние атомы не вмешивались в процесс, а затем в нее вводят дейтерий-тритиевую смесь. Снаружи расположены катушки, подключенные к переменному электрическому напряжению. Подобно первичной обмотке трансформатора, они создают

кольцевой ток в водородной плазме. В газе всегда есть свободные ионы и электроны, которые начинают двигаться в камере по кругу, как в короткозамкнутой вторичной трансформаторной обмотке. Этот ток нагревает газ, количество ионизированных атомов растет, одновременно увеличивается сила тока и повышается температура плазмы. А значит, количество водородных ядер, слившихся в ядро гелия и выделивших энергию, становится все больше.

Основной нагрев идет за счет джоулева тепловыделения. Сильно нагреваются прежде всего электроны плазмы, менее - ионы. Передача энергии от электронов к ионам идет медленно (из-за малости потока энергии). В этом состоит главное препятствие на пути решения проблемы достижения высоких температур. Приходится ухищряться и применять дополнительные



источники нагрева плазмы (высокочастотные поля, инжекцию предварительно разогнанных на ускорителях частиц, диссипацию магнитоакустических волн). Самая мощная подобная установка создана в России (Т-10). В ней достигнуты температуры ионов 15-20 млн. градусов. Это заметно меньше, чем температура, необходимая для поддержания термоядерной реакции.

**Рис.15.** Принципиальная схема токамака.

Теплоизоляция плазменного шнура и его удержание в токамаках достигается за счет внешнего и собственного магнитных полей. Магнитное поле сжимает плазменный шнур и отрывает его от стенки камеры. Этим достигается идеальная теплоизоляция. К сожалению, такая простая схема не привела к успеху. Плазменный шнур очень неустойчив и "живет" очень короткое время из-за разного рода пульсаций турбулентного типа. Он быстро распадается и вываливается на стенки камеры.

Оказалось, что к неустойчивости приводит комбинация нескольких сложных физических процессов. Здесь были различные виды колебаний и волн в плазме, возникающие в ней местные магнитные поля, блуждающие температурные неоднородности и масса других неожиданностей. Устойчивость плазмы можно повысить путем уменьшения кольцевого тока в плазме и использования для дополнительного нагрева мощных излучатели радиоволн сверхвысокой частоты - **гиротронов**.



На установке Т-10 время удержания плазмы составляет 0,06 с. Однако для реакции существенно не само время удержания плазмы, а произведение его на плотность плазмы ( $n\tau$ ).

**Рис.16.** Реактор токамака.

Для того чтобы КПД установки был больше единицы, нужно выполнить условие  $n\tau > 10^{20}$  м.см<sup>-3</sup>. В установке Т-10  $n\tau = 0,06 \cdot 10^{20}$  м/см<sup>3</sup>, что недостаточно. Можно возлагать надежды на вновь стоящую

установку Т-15, основным элементом которой является токамак с радиусом тороида равным 15 м. Обнадеживающим обстоятельством является то, что время удержания растет с увеличением размеров установки по закону  $\tau \sim R^2$ .

Полученные в России обнадеживающие результаты стимулировали создание токамаков во многих лабораториях мира, а их конфигурация стала предметом интенсивного исследования.

Омический нагрев плазмы в токамаке недостаточен для осуществления реакции термоядерного синтеза. Это связано с тем, что при нагреве плазмы сильно уменьшается ее электрическое сопротивление, и в результате резко снижается выделение тепла при прохождении тока. Увеличивать ток в токамаке выше некоторого предела нельзя, поскольку плазменный шнур может потерять устойчивость и переброситься на стенки камеры. Поэтому для нагрева плазмы используют различные дополнительные методы. Наиболее эффективные из них – инжекция пучков нейтральных атомов с высокой энергией и микроволновое облучение. В первом случае ускоренные до энергий 50–200 кэВ ионы нейтрализуются (чтобы избежать «отражения» их назад магнитным полем при введении в камеру) и инжектируются в плазму. Здесь они снова ионизируются и в процессе столкновений отдают плазме свою энергию. Во втором случае используется микроволновое излучение, частота которого равна ионной циклотронной частоте (частота вращения ионов в магнитном поле). На этой частоте плотная плазма ведет себя как абсолютно черное тело, т.е. полностью поглощает падающую энергию. На токамаке JET стран Европейского союза методом инжекции нейтральных частиц была получена плазма с ионной температурой 280 млн. кельвинов и временем удержания 0,85 с. На дейтериево-тритиевой плазме получена термоядерная мощность, достигающая 2 МВт. Длительность поддержания реакции ограничивается появлением примесей вследствие распыления стенок камеры: примеси проникают в плазму и, ионизуясь, существенно увеличивают энергетические потери за счет излучения. Сейчас работы по программе JET сосредоточены на исследованиях возможности контроля примесей и их удаления т.н. «магнитным дивертором».

Большие токамаки созданы также в США – TFTR, в России – T15 и в Японии – JT60. Исследования, выполненные на этих и других установках, заложили основу для дальнейшего этапа работ в области управляемого термоядерного синтеза: на 2010 г. намечается запуск большого реактора для технических испытаний. Предполагается, что это будет совместная работа США, России, стран Европейского союза и Японии.

Термоядерный реактор типа ТОКОМАК состоит из вакуумной камеры (внутренняя оболочка – первая стенка – изготавливается из бериллия), образующей канал, где циркулирует плазма, магнитов, создающих поле и систем нагрева плазмы. К этому прилагаются вакуумные насосы, постоянно откачивающие газы из канала, система доставки топлива по мере его выгорания и дивертор – система, через которую полученная в результате термоядерной реакции энергия выводится из реактора. Тороидальная плазма находится в вакуумной оболочке.  $\alpha$ - частицы, образующиеся в плазме в результате термоядерного синтеза и находящиеся в ней, повышают ее температуру. Нейтроны через стенку вакуумной камеры проникают в зону жидкого лития, в которой их кинетическая энергия превращается в тепло и в которой воспроизводится тритий. Литиевая оболочка (бланкет) помещена в специальную оболочку, которая защищает обмотку магнита от вылетающих нейтронов и  $\gamma$ -излучения. Обмотка магнита (рабочая температура 4К) охлаждается жидким гелием и находится в сверхпроводящем состоянии. Для отвода тепла литий прокачивают через теплообменник, расположенный за обмоткой магнита. Тепловая энергия от теплообменника передается обычной электростанции. В процессе циркуляции из лития циркуляции из лития удаляют образовавшиеся тритий и гелий.

Создание термоядерного реактора натолкнулось на ряд технологических трудностей.

1. При работе термоядерного реактора необходимо пополнять количество топлива (D+T) в реакторе и удалять  $^4\text{He}$  из плазмы. Вследствие этого отдается предпочтение пульсирующему термоядерному реактору, несмотря на то, что его энергетический баланс не является наилучшим: в каждом цикле следует вводить новую газовую смесь, нагревать и удерживать ее до тех пор, пока значительная часть D и T (10-20%) не вступит в реакцию слияния ядер. При этом должна быть изменена конфигурация магнитного поля.

2. Необходимость создания магнитных полей высокой напряженности (около 100 кЭ).
3. Металлы, из которых изготавливают вакуумную камеру, должны быть устойчивыми при температуре около 1000<sup>0</sup>С. При больших плотностях потока нейтронов в результате протекания (n,α)- и (n,p) – реакций в этих материалах образуются пузырьки газов, возникают дефекты в кристаллической решетке; материалы становятся хрупкими и непрочными. Вследствие высокой температуры дефекты быстро распространяются во всем объеме материала. Особенно опасна бомбардировка высокоэнергетическими альфа-частицами: атомы гелия не растворимы в металлах, выделяются из кристаллической решетки и образуют газовые пузырьки. Давление в пузырьках растет, пузырьки «взрываются» (блистеринг), атомы металла попадают в вакуумную камеру и гасят плазму (проблема первой стенки).

### **5.2 Пинч с обращенным полем (ПОП)**

Конфигурация ПОП отличается от токамака тем, что в ней направление тороидального поля вне плазмы противоположно его направлению внутри плазменного шнура. Дж.Тейлор показал, что такая система находится в состоянии с минимальной энергией и хорошо защищена от наиболее грубых крупноразмерных магнитогидродинамических неустойчивостей. От более мелких, локальных неустойчивостей ее в значительной мере защищает т.н. «магнитный шир» – изменение направления силовых линий суммарного магнитного поля при движении по радиусу шнура. Эксперименты на установке «Зета» в Англии показали, что в плазме может спонтанно возникать обращенная конфигурация поля, и когда это происходит, плазма сильнее нагревается и проявляет повышенную устойчивость. Достоинством конфигурации ПОП является то, что в ней отношение объемных плотностей энергии плазмы и магнитного поля больше, чем в токамаке. Это отношение должно быть как можно больше, чтобы уменьшить тороидальное поле, а следовательно, снизить стоимость создающих его катушек и всей несущей конструкции. Слабая сторона ПОП состоит в том, что термоизоляция у этих систем хуже, чем у токамаков, и не решена проблема поддержания обращенного поля.

### **5.3 Стелларатор**

Здесь, как и в ТОКАМАКе, плазма тоже подвешена в магнитном поле, но тока в ней нет. Греют плазму в основном мощным радиоизлучением, а держат ее только сложной формы магнитные поля, созданные внешними катушками. В стеллараторе на замкнутое тороидальное магнитное поле налагается поле, создаваемое специальной винтовой обмоткой, навитой на корпус камеры. Суммарное магнитное поле предотвращает дрейф плазмы в направлении от центра и подавляет отдельные виды магнитогидродинамических неустойчивостей. Сама плазма может создаваться и нагреваться любым из способов, применяемых в токамаке.

Главным преимуществом стелларатора является то, что примененный в нем способ удержания не связан с наличием тока в плазме (как в токамаках или в установках на основе пинч-эффекта), и потому стелларатор может работать в стационарном режиме. Кроме того, винтовая обмотка может оказывать «диверторное» действие, т.е. очищать плазму от примесей и удалять продукты реакции.

Удержание плазмы в стеллараторах всесторонне исследуется на установках Европейского союза, России, Японии и США. На стеллараторе «Вендельштейн VII» в Германии удалось поддерживать не несущую тока плазму с температурой более  $5 \cdot 10^6$  К, нагревая ее путем инъекции высокоэнергетичного атомарного пучка.

Последние теоретические и экспериментальные исследования показали, что в большинстве описанных установок, и особенно в замкнутых тороидальных системах, время удержания плазмы можно увеличить, увеличивая ее радиальные размеры и удерживающее магнитное поле. Например, для токамака подсчитано, что критерий Лоусона будет выполняться (и даже с некоторым запасом) при напряженности магнитного поля 50 - 100 кГс и малом радиусе тороидальной камеры 2 м. Таковы параметры установки на 1000 МВт электроэнергии.

При создании столь крупных установок с магнитным удержанием плазмы возникают совершенно новые технологические проблемы. Чтобы создать магнитное поле порядка 50 кГс в объеме нескольких кубических метров с помощью охлаждаемых водой медных катушек, потребуется источник электроэнергии мощностью в несколько сотен мегаватт. Поэтому очевидно, что обмотки катушек необходимо делать из сверхпроводящих материалов, таких, как сплавы ниобия с титаном или с оловом. Сопротивление этих материалов электрическому току в сверхпроводящем состоянии равно нулю, и, следовательно, на поддержание магнитного поля будет расходоваться минимальное количество электроэнергии.

#### **5.4 Открытая ловушка**

В установке типа открытой ловушки (пробкотрон) в цилиндрическую вакуумную камеру, запертую магнитными пробками, точно выбрав направление, впрыскивают атомы, которые тормозятся в водородном газе и превращают его в горячую плазму. Удерживают ее магнитные поля сложной конфигурации.

#### **5.5 Плазменный фокус**

В вакуумной камере между двумя электродами создается мощный импульс тока, который быстро нагревает плазму и дает всплеск ядерного синтеза. Плазма, как и в предыдущих случаях, связана с магнитным полем, но синтез идет в импульсах микросекундной длительности.

#### **5.6 Галатейя**

Традиционные магнитные ловушки, перечисленные выше, имеют одно общее свойство: плазма и магнитное поле в них "перемешаны". Это приводит к нескольким неприятным явлениям, одно из которых - неустойчивость плазменного шнура. Заряженные частицы плазмы движутся в поле по спиралям, образуя круговые токи. Собственные магнитные поля токов направлены противоположно полям внешним, и при их взаимодействии возникает сила, выталкивающая плазму из поля.

В устройствах, называемых галатейями, магнитное поле образует своего рода "корку", или "забор", который отбрасывает вылетающую частицу внутрь плазменного шнура. Для этого внутри плазменного объема нужно подвесить сверхпроводящие кольца, по которым циркулирует электрический ток. Один из вариантов такого "магнитотермоядерного реактора" был предложен А.Д.Сахаровым в 1950 году.

\* \* \*

Таким образом, ядерные реакции синтеза (в основном – между изотопами водорода) сопровождаются большим выделением энергии. Эти процессы были реализованы в термоядерном оружии. Кажется они перспективными и для получения энергии в мирных целях, например, для выработки электроэнергии. Поэтому созданию методов управляемого термоядерного синтеза уделяли и уделяют много внимания во всех развитых странах. При этом основные усилия направлены на создание установок для поддержания высокотемпературной плазмы в вакуумных камерах. К сожалению, это направление пока не привело к успеху.

Полагают, что решение проблемы управляемого термоядерного синтеза обеспечит человечество энергией практически на неограниченный срок. Будущий термоядерный генератор энергии должен удовлетворять следующему основному требованию: энерговыделение в результате ядерного синтеза должно с избытком компенсировать затраты энергии из внешних источников на поддержание высокой температуры реагирующей плазмы. Проблема достижения выгодного энергетического баланса термоядерного реактора достаточно сложна ввиду наличия неустраиваемых энергетических потерь.