

(т. е. очень медленно), либо путём перезарядки на частицах остаточного газа (см. *Перезарядка ионов*). Уход плазмы вдоль силовых линий также замедлен благодаря наличию областей усиленного магн. поля (т. н. магн. зеркал, или магн. пробок), размещённых на открытых концах ловушки. Заполнение ловушек плазмой обычно производится путём инъекции плазменных сгустков или пучков частиц, обладающих большой энергией (подробнее см. *Магнитные ловушки*).

В системах замкнутого типа (*токамак, стелларатор*) уход частиц на стенки тороидальной установки поперёк продольного магн. поля также затруднён и происходит за счёт замагниченной диффузии и перезарядки. Нагревание плазменного шнура в токамаке на нач. стадиях процесса осуществляется протекающим по нему кольцевым током. Однако по мере повышения темп-ры джоулев нагрев становится менее эффективным, т. к. сопротивление плазмы быстро падает с ростом темп-ры. Для нагревания плазмы св. 10^7 К применяются методы высокочастотного нагрева или ввод энергии в плазму с помощью быстрых нейтральных частиц (см. *Нагрев плазмы*).

В установках импульсного действия (*Z-пинч и θ -пинч*) нагревание плазмы и её удержание осуществляются сильными кратковрем. токами, протекающими через плазму. При нарастании тока и одновременно нарастании магн. давления плазма отжимается от стенок установки, чем обеспечивается её термоизоляция. Повышение темп-ры происходит за счёт джоулева нагрева, за счёт адиабатич. сжатия плазменного шнура и, по-видимому, в результате турбулентных процессов при развитии *неустойчивостей плазмы* (подробнее см. *Пинч-эффект и Плазменный фокус*).

Успешная работа и дальнейшее развитие любой из перечисленных систем возможно только при условии, что исходная плазменная структура оказывается макроскопически устойчивой, сохраняя заданную форму в течение всего времени, необходимого для протекания реакции. Кроме того, в плазме должны быть подавлены те микроскопич. неустойчивости, при возникновении и развитии к-рых распределение частиц по энергиям перестаёт быть равновесным и потоки частиц и тепла поперёк силовых линий резко возрастают по сравнению с их теоретич. значением. Именно в направлении стабилизации плазменных неустойчивостей разного типа развивались осн. исследования магн. систем начиная с 1952, и эта работа ещё полностью не может считаться завершённой.

Сверхбыстродействующие системы УТС с инерциальным удержанием. Трудности, связанные с магн. удержанием плазмы, можно, в принципе, обойти, если «сжигать» термоядерное горючее за чрезвычайно малые времена, когда нагретое вещество не успевает разлететься из зоны реакции. Согласно критерию Лоусона, реализация УТС при таком способе сжигания может быть достигнута лишь при очень высокой плотности рабочего вещества. Чтобы избежать ситуации термоядерного взрыва большой мощности, нужно использовать очень малые порции горючего: исходное термоядерное топливо должно иметь вид небольших крупинок (диам. неск. мм), приготовленных из смеси твёрдого дейтерия и трития, впрыскиваемых в реактор перед каждым его рабочим тактом. Гл. проблема заключается в быстром подведении необходимой энергии для разогрева крупинок горючего. Решение этой проблемы возлагается на применение лазерного излучения (см. *Лазерный термоядерный синтез*) или интенсивных сфокусированных пучков быстрых заряд. частиц. Исследования в области УТС с применением лазерного нагрева были начаты в 1964; использование пучков тяжёлых и лёгких ионов находится на ещё более ранней стадии изучения (см. *Ионный термоядерный синтез*).

Энергия W , к-рую необходимо подводить к крупинке горючего для обеспечения работы установки в реакторном режиме, как следует из простого расчёта, обратно пропорциональна квадрату плотности дейтерий-тритиевого топлива. Оценки показывают, что допустимые значения W получаются лишь в случае резкого, в 10^2 — 10^3 раз, увеличения плотности термоядерного топлива по сравнению

с исходной плотностью твёрдой (d, t)-мишени. Столь высокие степени сжатия, необходимые для получения столь больших плотностей, оказываются достижимыми при испарении поверхностных слоёв симметрично облучаемой мишени и реактивном сжатии её внутр. зон. Для этого подводимая мощность должна быть определённым образом запрограммирована во времени. Др. возможности состоят в программировании радиального распределения плотности вещества и в использовании сложных многооболочечных мишеней. Необходимая энергия оценивается в $\sim 10^6$ — 10^7 Дж, что лежит в пределах совр. возможностей лазерной техники. К цифрам такого же масштаба приводит анализ систем с ионными пучками.

Трудности и перспективы. Исследования в области УТС сталкиваются с большими трудностями как чисто физ., так и техн. характера. К первым относится уже упомянутая проблема устойчивости горячей плазмы, помещённой в магн. ловушку. Применение сильных магн. полей спец. конфигурации позволило подавить мн. виды макроскопич. неустойчивостей, но окончат. решение вопроса пока отсутствует.

В частности, для интересной и важной системы — токамак — остаётся т. н. проблема «большого срыва», при к-рой плазменный токовый шнур сначала стягивается к оси камеры, затем ток прерывается за неск. мс и на стенки камеры сбрасывается большая энергия. Кроме теплового удара камера испытывает при этом и механич. удар.

Серьёзную трудность представляет также образование пучков быстрых электронов, оторванных от осн. ансамбля электронов плазмы. Эти пучки приводят к сильному возрастанию потоков тепла и частиц поперёк поля. В сверхбыстродействующих системах также наблюдается образование группы быстрых электронов в плазменной короне, окружающей мишень. Эти электроны успевают преждевременно нагреть центральные зоны мишени, препятствуя достижению необходимой степени сжатия и последующего запрограммированного протекания ядерных реакций. Осн. трудность в этих системах — осуществление устойчивого сферически-симметричного сжатия мишеней.

Ещё одна трудность связана с проблемой примесей. Эл.-магн. излучение при используемых значениях n и T плазмы и возможных размерах реактора свободно покидает плазму, но для чисто водородной плазмы эти энергетич. потери, определяемые в осн. тормозным излучением электронов, в случае (d, t)-реакций перекрываются ядерным энерговыделением уже при темп-рах выше $4 \cdot 10^7$ К. Однако даже малая добавка чужеродных атомов с большим Z , к-рые при рассматриваемых темп-рах находятся в сильно ионизованном состоянии, приводят к возрастанию энергетич. потерь выше допустимого уровня. Требуются чрезвычайные усилия (непрерывное совершенствование вакуумных установок, использование тугоплавких и труднораспыляемых веществ, таких, напр., как графит, вольфрам, молибден, в качестве материала диафрагм, применение устройств для улавливания атомов примесей и т. д.), чтобы содержание примесей в плазме оставалось ниже допустимого уровня ($\leq 0,1\%$). Для инерциальных систем — предотвращение перемешивания вещества сжимающей оболочки с термоядерным топливом на конечных стадиях сжатия.

На рис. 3 указаны параметры, достигнутые на разл. установках к 1994. Как видно, параметры этих систем близки к пороговым значениям. Мало того, на самом большом работающем токамаке JET (Зап. Европа) в ноябре 1991 был впервые осуществлён разрядный импульс на (d, t)-плазме длительностью ок. 2 с. При этом была получена энергия синтеза в управляемых условиях на уровне мощности ~ 1 МВт. Годом позже на установке TFTR была получена энергия ~ 6 МВт. Из экологич. соображений опыты проводились не на равнокомпонентной смеси дейтерия и трития, а с содержанием трития на уровне 10—11%. В эксперименте на TFTR отношение энергии синтеза к затрач. энергии равнялось 0,15 (в пересчёте на равнокомпонентную смесь $\sim 0,46$). Успех этих экспериментов отчётливо выдвинул токамак на ведущее место среди установок.