

Эфф. сечение термоядерных реакций быстро возрастает с темп-рой, но даже в оптим. условиях остаётся несравненно меньше эфф. сечения атомных столкновений. По этой причине реакции синтеза должны происходить в полностью ионизованной плазме, нагретой до высокой темп-ры, где процессы ионизации и возбуждения атомов отсутствуют и дейтон-дейтонные или дейтон-тритонные столкновения рано или поздно завершаются ядерным синтезом.

Уд. мощность ядерного энерговыделения реактора равна произведению числа актов ядерных реакций, происходящих ежесекундно в единице объёма рабочей зоны реактора, на энергию, выделяющуюся при каждом акте реакции.

Применение законов сохранения энергии и числа частиц позволяет высунуть нек-рые общие требования, предъявляемые к термоядерному реактору, не зависящие в первом приближении от к.-л. особенностей технол. или конструктивного характера. На рис. 1 изображена принципиальная

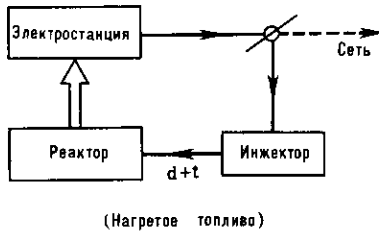


Рис. 1.

схема работы реактора. Установка содержит чистую водородную плазму плотностью n при темп-ре T . В реактор вводится «топливо», напр. равнокомпонентная смесь дейтерия и трития, уже нагретая до необходимой темп-ры. Внутри реактора инжектируемые частицы сталкиваются между собой и происходит их ядерное взаимодействие с выделением энергии. Параллельно с этим, однако, часть энергии теряется за счёт тормозного излучения плазмы, ухода нек-рой доли высокоэнергичных частиц, не успевших провзаимодействовать, охлаждения плазмы за счёт различных для каждой конкретной установки механизмов и за счёт выгорания ядерного топлива. Пусть τ — ср. время удержания частиц в реакторе; смысл величины τ таков: за 1 с из 1 см³ плазмы в ср. уходит n/τ частиц каждого знака. В стационарном режиме в реактор нужно ежесекундно инжектировать такое же число частиц (в расчёте на единицу объёма). А для покрытия энергетич. потерь подводимое топливо должно подаваться в зону реакции с энергией, превышающей энергию потока ускользящих частиц на величину потерь, обусловленных эл.-магн. излучением плазмы. Эта дополнит. энергия может быть получена за счёт энергии синтеза, выделяющейся в зоне реакции, а также за счёт частичной рекуперации в стенках и оболочке реактора эл.-магн. излучения и корпускулярных потоков. Примем для простоты, что коэф. преобразования в электрэнергию энергии, выделяющейся в ядерных реакциях, энергич. эл.-магн. излучения и тепловой энергии частиц одинаков и равен η . В условиях стационарной работы системы и при нулевой полезной мощности, когда во внеш. сеть электрэнергия не отдаётся, ур-ние баланса энергии в реакторе имеет вид

$$\eta(P_0 + P_r + P_i) = P_r + P_i,$$

где P_0 — мощность ядерного энерговыделения, P_r — мощность потока излучения, P_i — энергетич. мощность потока ускользящих частиц. Когда левая часть равенства становится больше правой, реактор перестаёт расходовать энергию и установка начинает работать как электростанция, подавая энергию в сеть, а не потребляя её. Величины P_0 , P_r и P_i известным образом зависят от темп-ры плазмы T , и из ур-ния баланса легко вычисляется произведение $n\tau = f(T)$, где $f(T)$ для заданного значения кпд η и выбранного сорта топлива есть вполне определённая

ф-ция темп-ры. На рис. 2 приведены графики $f(T)$ для двух значений η и для обеих ядерных реакций (d, d) и (d, t). Если величины $n\tau$, достигнутые в данной установке, расположатся выше кривой $f(T)$, это будет означать, что система работает как генератор энергии. При $\eta = 1/3$ энергетически выгодная работа реактора в оптим. режиме (минимум на кривых, рис. 2) для реакции (d, d) отвечает условию (т. н. Лоусона критерий) $n\tau \geq 10^{15}$ см⁻³·с, $T \sim 10^9$ К; для реакции (d, t) — условию $n\tau \geq 0,5 \cdot 10^{14}$ см⁻³·с, $T \sim 2 \cdot 10^8$ К. Т. о., даже в оптим. условиях для реактора, работающего на равнокомпонентной смеси дейтерия и трития, и при весьма оптимистич. предположениях относительно величины кпд необходимо достижение темп-р $\sim 2 \cdot 10^8$ К. При этом для плазмы плотностью $\sim 10^{14}$ см⁻³ должны быть обеспечены времена удержания порядка секунд. Конечно, энергетически выгодная работа реактора может происходить и при более низких темп-рах, но за это придётся «расплачиваться» увеличенными значениями $n\tau$. Т. о., сооружение реактора предполагает: 1) получение плазмы, нагретой до темп-р $\sim 10^8$ К; 2) сохранение в рабочей зоне реактора плазмы с заданной плотностью в течение времени, необходимого для протекания ядерных реакций.

Тот факт, что в рассмотренный критерий реализации реактора синтеза n и τ входят не независимо, а в виде произведения $n\tau$, приводит к тому, что исследования по проблеме УТС ведутся в двух осн. направлениях: разработка квазистационарных систем с магн. удержанием плазмы и предельно быстродействующих систем с инерциальным удержанием плазмы.

Системы с магнитной термоизоляцией. Энергетич. выход на уровне 10^3 кВт/м³ достигается для (d, t)-реакций при плотности плазмы $n \sim 10^{14}$ см⁻³ и темп-ре $\sim 10^8$ К. Это означает, что размеры рабочей зоны реактора на 10^3 МВт (типичная мощность совр. крупной электростанции) должны составлять ок. 1000 м³. Осн. вопрос состоит в том, каким способом удерживать горячую плазму в зоне реакции. Диффузионные потоки частиц и тепловые потоки при указанных значениях n и T оказываются гигантскими и любые материальные стенки непригодными. Основоплагающая идея, определившая на долгие годы пути развития проблемы в данном направлении, была высказана в СССР, США и Великобритании практически одновременно.

Эта идея состоит в использовании для удержания и термоизоляции плазмы магн. полей. В СССР она была высказана И. Е. Таммом и А. Д. Сахаровым в 1950. Заряж. частицы, образующие плазму, находясь в магн. поле, не могут свободно перемещаться перпендикулярно силовым линиям поля. Коэф. диффузии и теплопроводности поперёк магн. поля в случае устойчивой плазмы изменяются обратно пропорционально квадрату напряжённости поля и, напр., в полях $\sim 10^5$ Гс уменьшаются на 14—15 порядков величины по сравнению со своими значениями для немагнитической плазмы той же плотности и темп-ры. Т. о., применение достаточно сильного магн. поля в принципе открывает дорогу для проектирования термоядерного реактора.

Исследования в области УТС с магн. термоизоляцией делятся на три осн. направления: 1) открытые (или зеркальные) магн. ловушки; 2) замкнутые магн. системы; 3) установки импульсного действия.

В открытых ловушках уход частиц из рабочей зоны поперёк силовых линий на стенку установки затруднён, он происходит либо в ходе процесса замагнитической диффузии

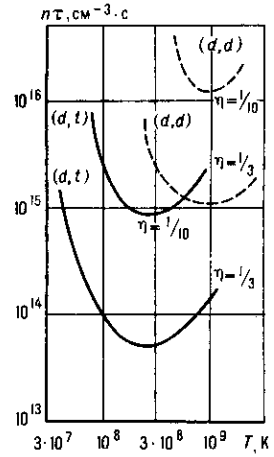


Рис. 2.