

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



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

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

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

§ 5. Энергетика будущего

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

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

все увеличивающееся потребление нефти, ее разведанные запасы продолжают расти благодаря расширению и совершенствованию геологической разведки. И все же на исторически длительный срок ни угля, ни нефти человеку не хватит. Энергетические запасы ядерного горючего — урана ${}_{92}\text{U}^{235}$ — в рудах примерно на 2 порядка превышают энергетические запасы химических топлив. Поэтому переход к ядерной энергетике решает проблему производства достаточных количеств энергии как минимум на несколько столетий даже с учетом роста потребления энергии.

3. С созданием энергетических реакторов-размножителей запасы энергии в земной коре стали практически неограниченными, поскольку топливом стал не только уран ${}_{92}\text{U}^{235}$, но и значительно более распространенный уран ${}_{92}\text{U}^{238}$, а в перспективе и торий ${}_{90}\text{Th}^{232}$.

Колоссальность запасов тория и урана обусловлена тем, что они содержатся не только в специальных рудах, но и в таких повсеместно распространенных материалах, как гранит. В каждой тонне гранита в среднем содержится 3 г урана и 12 г тория. Даже при потреблении энергии $5 \cdot 10^8$ МВт (на два порядка выше, чем сейчас) энергетических запасов урана и тория в граните хватит более чем на 10^9 лет. Таким образом, создание реакторов-размножителей является не просто очередным техническим достижением, но и решением проблемы снабжения человечества энергией на много геологических эпох вперед. Перспективная стоимость переработки одной тонны гранита оценивается примерно в два рубля. Для верхней границы стоимость 1 кВт·ч энергии получается 0,2 коп. — цифра, сравнимая со стоимостью электроэнергии на существующих угольных электростанциях.

4. В перспективе, когда удастся преодолеть все трудности, стоящие на пути создания энергетических термоядерных установок и воспроизводства трития, человечество получит еще один практически неисчерпаемый источник энергии, поскольку запасы лития и дейтерия в земной коре очень велики. Полному количеству дейтерия в океанской воде соответствует энергетический запас 10^{17} МВт·лет. Таким образом, энергетические запасы дейтерия в океане имеют тот же порядок, что и энергетические запасы тория и урана в скалах. Добыча дейтерия из морской воды относительно проста и в переводе на энергетический эквивалент крайне дешева (около 10^{-3} коп. за кВт·ч). Запасов лития достаточно для удовлетворения современных энергетических потребностей человечества в течение сотен тысяч лет. Если не удастся освоить реакцию $d + d$, то запасы термоядерного горючего будут ограничиваться запасами лития. Сравним относительные достоинства атомных и термоядерных электростанций в предположении, что последние также созданы и функционируют.

Для поддержания работы ядерного реактора необходима значительная доля возникающих в реакции деления нейтронов, а выделяющаяся энергия не нужна.

Для поддержания работы термоядерного реактора, наоборот, необходима значительная доля выделяющейся в реакции энергии, а возникающие нейтроны не нужны.

Резюмируя, можно сказать, что ядерным реакторам свойствен дефицит нейтронов и избыток энерговыделения, а термоядерным, наоборот, дефицит энерговыделения и избыток нейтронов. Такая «дополнительность» сильных и слабых сторон ядерных и термоядер-

ных реакторов естественно приводит к идее о комбинированных ядерно-термоядерных системах. Например, есть предложение термоядерный реактор окружить оболочкой из делящегося материала (т. е. ядерным реактором). В таком устройстве внешний ядерный реактор сможет работать на бедной смеси в подкритическом режиме с внешней «подкачкой» нейтронами термоядерного реактора, а термоядерный реактор сможет работать при значении параметра удержания на 1—2 порядка ниже даваемого критерием Лоусона (11.36).

Такое гибридное решение наиболее удобно для $d + d$ -реакции. Для установок, работающих на $d + t$ -реакции, выделяющиеся в ней нейтроны нужны прежде всего для воспроизводства трития.

5. Серьезным недостатком ядерных энергетических установок крупного масштаба является образование большого количества радиоактивных отходов, надежное захоронение которых является сложной экологической проблемой. Радиоактивные отходы от термоядерных реакторов (при сравнимой полезной мощности) по оценкам специалистов могут быть примерно на три порядка ниже. Это различие сотрется при переходе к комбинированным ядерно-термоядерным системам.