

УСПЕХИ ФИЗИЧЕСКИХ НАУКФИЗИКА НАШИХ ДНЕЙ

533.92

УПРАВЛЯЕМЫЙ ТЕРМОЯДЕРНЫЙ СИНТЕЗ *)
(результаты и общие перспективы)*Д. Роуз*

Кроме удержания плазмы существенны также факторы, связанные с техникой и размещением.

Попытка получения энергии за счет управляемого термоядерного синтеза будет интересной темой для философов и историков, посвятивших себя вопросам науки и техники. Смысл этого экстравагантного утверждения, которое может показаться слишком сильным, в том, чтобы сразу же подчеркнуть, что существующее положение вещей определяют очень многие факторы, не все из которых являются чисто физическими, а с некоторыми вообще приходится встречаться впервые. Ниже я попытаюсь полнее раскрыть смысл этих слов.

1. ОСНОВЫ ПРОБЛЕМЫ

Исследования управляемого термоядерного синтеза прошли несколько этапов; отправной точкой первого этапа были следующие четыре положения: 1) Измерения энергии и эффективного сечения реакций между изотопами водорода и ядрами других легких элементов показали, что в соответствующих условиях может высвобождаться большое количество энергии. 2) Известные законы физики, описывающие поведение отдельных частиц, казалось, давали ответ на то, как можно удерживать рой быстрых ионов и электронов в магнитном поле достаточно долго, чтобы создать эти соответствующие условия. 3) Радиоактивные компоненты и побочные продукты термоядерного синтеза представлялись гораздо менее опасными, чем аналогичные продукты ядерного деления, поэтому термоядерный реактор мог бы быть проще и безопаснее реакторов деления. 4) Дейтерий, являющийся термоядерным топливом, имеется в изобилии — 1 часть на 7000 частей обычного водорода, — и добыча его из обычной воды не представляет трудностей. Таково было состояние дел на ранней стадии, приблизительно до 1955 г. Для того чтобы сделать водородную бомбу, нужен только первый пункт. Комбинация же всех четырех положений захватила воображение большой и весьма компетентной части общины

*) David J. Rose, Controlled Nuclear Fusion: Status and Outlook, Science 172 (No. 3985), 797 (1971). Перевод Е. И. Доброхотова.

Автор статьи Дэвид Дж. Роуз, профессор Массачусетского технологического института, в настоящее время возглавляет отдел долгосрочных прогнозов Оксиджской Национальной лаборатории, США.

физиков. Последовавшие за этим исследования управляемого синтеза, конечной целью которых должен был бы быть источник мирной энергии, вдохновлялись иногда соображениями морального характера, возможно, как реакция на то мрачное применение, которое нашла себе атомная энергия. Каковы бы ни были причины, труд работающих над этой проблемой можно было бы сравнить с усилиями поднимающегося на Эверест альпиниста, который знает, что на вершине его ждет закованный в цепи Прометей. Удачным оказалось также и то, что специалисты 1953 г. не представляли себе всего объема физики плазмы, который еще предстояло открыть прежде, чем перейти от надежд к их реализации. В дальнейшем мы кратко рассмотрим предпринятые на последующих стадиях исследования попытки пройти предстоящий путь, хотя еще до сих пор не известно, не упирается ли он в непроходимую пропасть.

В настоящее время общее мнение сходится на том, что в физическом смысле управляемый термоядерный синтез, по-видимому, осуществим. Однако, чтобы ответить на вопрос, окажется ли термоядерный реактор действительно практичным, необходимо учитывать другие факторы, такие, как создание в больших объемах сильных магнитных полей при низкой стоимости, сведение к минимуму влияния повреждения материалов быстрыми нейтронами и т. д. Все они одинаково существенны для успеха, причем относящиеся к ним физические законы известны лучше, чем законы физики плазмы, поэтому здесь остается гораздо меньше места для маневров и спекуляций.

Сказанное выше служит введением для нескольких главных тем: как обстоят дела сейчас, что еще нужно, чтобы осуществить физическую термоядерную реакцию, что еще необходимо сделать для того, чтобы заработал промышленный термоядерный реактор, и насколько термоядерный синтез отвечает или не отвечает нашим предполагаемым запросам в будущем.

Имеется несколько экзотермических ядерных реакций синтеза. Наиболее привлекательна из них реакция дейтерия (D) с тритием (T):



и именно она будет иметься в виду при последующем обсуждении. Энергия реакции мала, если сравнивать ее с энергией 200 Мэв, выделяющейся при реакции деления урана, но в расчете на единицу массы она больше. Приблизительно при 100 кэв эффективное сечение реакции имеет максимум, равный $5 \cdot 10^{-24} \text{ см}^2$, что по ядерным масштабам — очень большая величина. Из высвобождающихся 17,6 Мэв 3,5 Мэв приходится на ядро ${}^4\text{He}$ и 14,1 Мэв на нейтрон.

Многие трудности, стоящие на пути освоения термоядерной реакции, заключены уже в этих простых фактах. Прежде всего обратите внимание на ядерное топливо. Дейтерий почти ничего не стоит, но тритий не встречается в природе, и, следовательно, его необходимо регенерировать, используя нейтроны из реакций синтеза.

Наиболее серьезную проблему представляет характер самих реакций, так как энергия частиц должна быть около 10 кэв или выше, чтобы ядра D и T могли преодолеть взаимное электростатическое отталкивание и слиться. К сожалению, эффективное сечение рассеяния из-за этого отталкивания значительно превосходит эффективное сечение слияния при таких энергиях; в результате частицы, прежде чем вступить в реакцию, несколько раз рассеиваются друг на друге. Отсюда следует, что топливо будет представлять собой облако ионов с хаотически направленными скоростями и их средняя энергия должна превышать 10 кэв. Пользуясь обычной терминологией, это — газ с температурой более 10^8 градусов

Кельвина. Фактически это будет полностью ионизованная плазма, состоящая из ионов D^+ и T^+ и равного их сумме числа электронов, необходимых, чтобы среда была макроскопически нейтральной.

Как уже говорилось, главная трудность состоит в удержании такой плазмы. Только благодаря инерции взрывающиеся ядерные устройства на $T-D$ остаются целыми в течение промежутка времени (менее 10^{-7} сек), достаточного, чтобы их компоненты прореагировали. В процессе взрыва ядра 4He (и отчасти нейтроны) замедляются в непрореагировавшем веществе и нагревают его до температуры «вспышки»; кратковременное давление достигает миллионов атмосфер. Для более медленного, контролируемого протекания реакции давления должны быть такими, чтобы их могли выдерживать реальные конструкции; системы, которые можно сейчас себе представить, будут иметь размеры приблизительно от 1 до 10 м, и поэтому давления, превышающие, скажем, несколько сотен атмосфер, вряд ли будут реальными. Это ограничение, с учетом уже установленной величины температуры, определяет плотность ионов. В зависимости от типа установки плотность ионов оказывается равной от 10^{14} до 10^{18} см $^{-3}$, что на 7—9 порядков величины меньше плотности твердых тел и на 4—6 порядков меньше плотности окружающего нас воздуха. Время удержания, необходимое для того, чтобы прореагировала заметная часть ядерного топлива, составляет от 0,01 до 1 сек. Важнейшим параметром является произведение плотности на время удержания, которое должно быть равно 10^{14} сек·см 3 или больше,—это так называемый критерий Лоусона. Общая масса реагирующих ядер в любой момент времени будет всего лишь около 1 г, даже если система непрерывно работает на уровне мощности в несколько тысяч мегаватт. Все это очень сильно отличается от условий, характерных для различных взрывов.

2. СОВРЕМЕННАЯ ПРОГРАММА ИССЛЕДОВАНИЙ

Мы не будем подробно рассматривать многочисленные достижения физики плазмы, лежащие в основе систем, предназначенных для удержания плазмы. Однако для последующего изложения необходимо некоторое знакомство с вопросом. Все основные системы, разрабатывавшиеся до сих

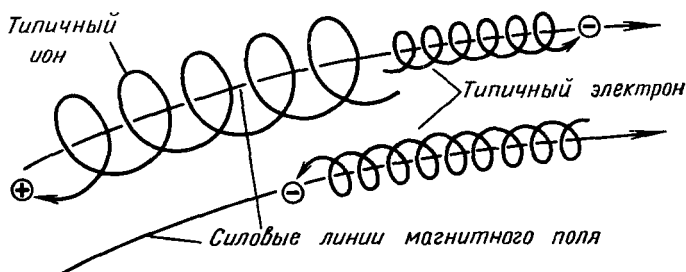


Рис. 1. Траектории ионов и электронов в магнитном поле.

пор, предполагают наличие больших объемов, заполненных сильным магнитным полем. Магнитные силы препятствуют движению ионов и электронов плазмы поперек направления магнитного поля, но заряженные частицы могут двигаться по спиралям, навитым вдоль силовых линий (рис. 1). Наивно рассуждая, можно считать, что по двум перпендикулярным полю направлениям удержание достигнуто и остается только позаботиться об удержании плазмы вдоль направления магнитного поля. Из этих простых представлений на первых же порах развития проблемы возникли два

существенно различающихся класса устройств *). На рис. 2 силовые линии изогнуты так, что они образуют замкнутую тороидальную систему и для ухода частиц нет другого пути, кроме как поперек силовых линий

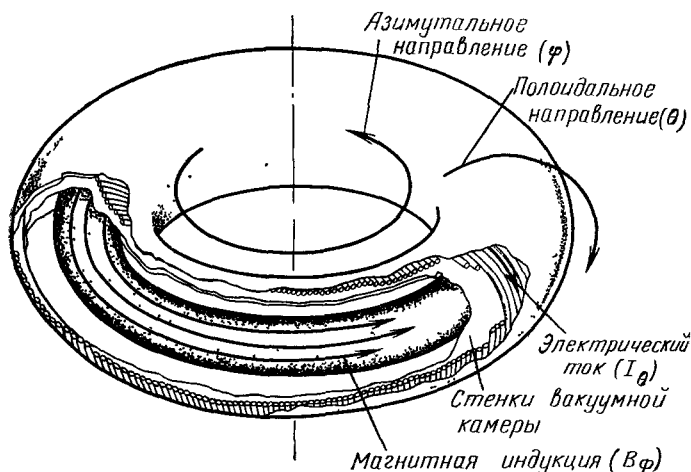


Рис. 2. Тороидальное магнитное поле B_ϕ , создаваемое полоидальными электрическими токами I_θ .

магнитного поля; такие устройства получили название «замкнутых систем».

В установках другого класса (рис. 3) ионы (и электроны) отражаются от торцов из-за нарастающего к краям магнитного поля. Здесь вступает

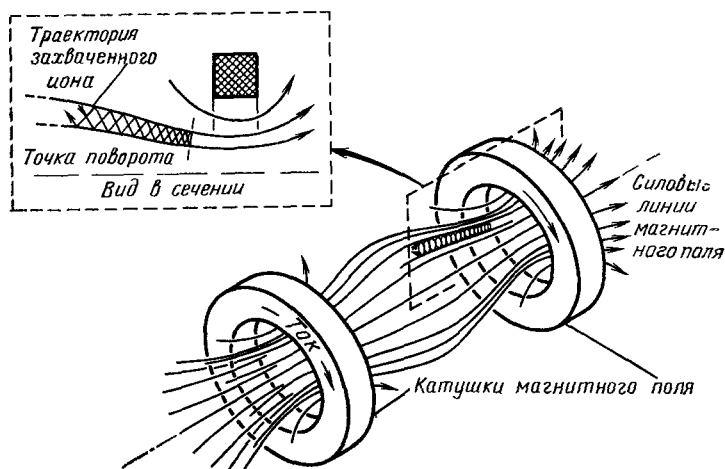


Рис. 3. Конфигурация поля с магнитными зеркалами для удержания заряженных частиц (и плазмы).

в игру новый механизм: каждый ион, движущийся вдоль магнитного поля, обладает постоянной кинетической энергией U , разумеется, если он не взаимодействует с другими ионами и электронами и не участвует

*) Очень хороший обзор состояния проблемы до 1958 г. содержится в работе ¹. Вопросы удержания плазмы рассмотрены также в обзорах ².

в реакции синтеза. Полная энергия U может быть представлена суммой энергии вращательного движения, перпендикулярного магнитным силовым линиям, — $U_{\perp}$, и энергии движения вдоль силовых линий — $U_{\parallel}$:

$$U = U_{\perp} + U_{\parallel}.$$

Можно показать *), что величина перпендикулярной составляющей $U_{\perp}$ пропорциональна напряженности магнитного поля B :

$$U_{\perp} = \mu B,$$

где μ — так называемый магнитный момент, постоянный для каждой частицы и зависящий от деталей ее орбиты. Отсюда находим

$$U_{\parallel} = U - \mu B.$$

Вывод из этого уравнения очевиден: если у торцов устройства, показанного на рис. 3, магнитное поле становится достаточно большим, то μB возрастает до тех пор, пока не станет равным U и на долю параллельного движения не остается энергии $U_{\parallel}$. Частица должна «отражаться» от областей сильного магнитного поля и, следовательно, будет удерживаться в центральной части **). Такая конфигурация поля получила название «магнитного зеркала» ***).

Недостаток «открытых систем» типа рис. 3 как раз и заключается в открытых торцах. Те ионы или электроны, которые в центральной части установки движутся почти по силовым линиям, обладают малыми магнитными моментами. В этом случае максимум поля в магнитном зеркале оказывается недостаточным для отражения частицы, и она уходит через торец. Кулоновское рассеяние постоянно поставляет частицы с такими неблагоприятными направлениями скоростей; следовательно, магнитным зеркалам присущи утечки, даже если не происходит никаких других неприятностей.

Во всех случаях типичные значения максимума удерживающего магнитного поля должны составлять 8—10 *мл****)*, а эквивалентное магнитное давление $B^2/2\mu_0$ (в системе *м-кг-сек*) = 300 *атм*.

Слабость всех этих красивых и изящных систем в том, что удержание плазмы в них оказывается неустойчивым, и причиной этого являются неучитывавшиеся электрические эффекты, которые пренебрежимо малы для нескольких отдельно взятых частиц, но существенны для большого набора частиц (каким, собственно, и является плазма). На этом закончился первый этап исследований управляемого термоядерного синтеза — своего рода пора невинности.

Как в замкнутых, так и в открытых системах типа рис. 2 или рис. 3 некоторые силовые линии магнитного поля неизбежно оказываются изогнутыми выпуклостью наружу от плазмы; в этих местах в плазме стремятся развиться неуправляемые аневризмы. Модификация исходной конфигурации магнитного поля (и существенное увеличение стоимости и сложности установок) может уменьшить эти неустойчивые выбросы, но слабая турбулентность, по-видимому, все же останется. В результате плазма

*) Относительно вопросов физики плазмы см., например, 3.

**) Именно по такой схеме происходит удержание ионов и электронов большой энергии в окружающих Землю радиационных поясах Ван-Аллена. Частицы отражаются над ионосферой у северного и южного магнитных полюсов и движутся между ними вдоль силовых линий слабого магнитного поля, удаляясь далеко от Земли.

***)) В русской литературе встречается также термин «магнитные пробки».
(Прим. перев.)

****)) 1 тесла = 1 *вб/м²*, или 10⁴ *гс*. Магнитное поле Земли у поверхности равно приблизительно 0,5 *гс*.

будет с большой скоростью диффундировать и к окружающим ее стенкам вакуумной камеры, и на торцы.

Рассмотрение с точки зрения диффузии полезно для иллюстрации современного, второго, этапа развития исследований по управляемому термоядерному синтезу. Если внутреннее движение плазмы рассматривать исходя из теории диффузии (в отношении правомерности этого существуют некоторые сомнения, которые, однако, здесь игнорируются), то можно ввести некоторый коэффициент диффузии D . Теория утверждает, что время удержания τ_c , например, в длинном цилиндре с радиусом стенок r_w равно

$$\tau_c = r_w^2 / 6D. \quad (1)$$

Чтобы получить большое τ_c , нужен малый коэффициент диффузии и, что еще важнее, большие размеры системы. Сейчас принято считать ⁴, что коэффициент диффузии, по-видимому, должен быть много меньше бомовского коэффициента D_B для полностью турбулентной плазмы:

$$D_B = (kT_e/e)/16B; \quad (2)$$

здесь kT_e/e — температура электронов, измеренная в электрон-вольтах. Далее, можно записать

$$D = D_B/A; \quad (3)$$

безразмерный множитель A характеризует качество удержания, измеренное в единицах «бомовского времени». При $A = 1$ диффузионный распад

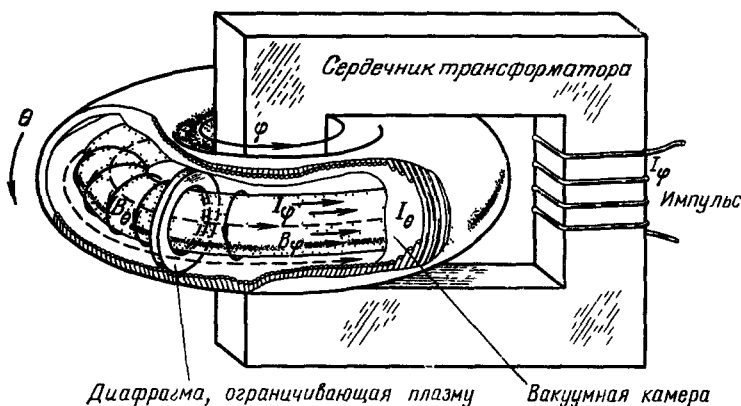


Рис. 4. Схема удержания плазмы в «Токамаке».

плазмы будет соответствовать коэффициенту D_B . Для системы удержания, обеспечивающей термоядерный синтез, необходимо, по крайней мере, выполнение условия $A \geq 100$; точное числовое значение зависит от конкретного типа устройств *).

Оценка того, сколь далеки от этой цели современные экспериментальные установки, оказывается не только полезной, но и обнадеживающей. Этих установок много, однако для нашего обзора хватит одного примера. Установки типа «Токамак» ⁶, разработка которых была начата в Институте атомной энергии им. И. В. Курчатова в Москве и которые на сегодня являются одними из наиболее перспективных, представляют собой прямое развитие схемы рис. 2; в последнее время различные варианты установок этого типа появились в нескольких плазменных лабораториях Соединенных Штатов. Устройство «Токамака» показано на рис. 4:

*) Эта оценка, а также ряд последующих взяты из обзора ⁵.

как и раньше, сохраняется сильное азимутальное магнитное поле B_ϕ . Кроме того, тороидальный плазменный виток сам является вторичной обмоткой трансформатора и служит двум дополнительным целям. Во-первых, мощный импульс тока через первичную обмотку вызывает ионизацию газа и индуцирует вторичный ток I_ϕ в плазме; этот ток нагревает плазму, вызывая слабую диссипативную турбулентность — есть надежда, что она как раз достаточна для нагрева и недостаточна для развала плазмы. Во-вторых, ток I_ϕ создает новое — полоидальное магнитное поле B_θ , показанное на рисунке; комбинация этих двух полей (B_ϕ и B_θ) создает структуру удерживающего поля (картина поля напоминает узор на покрышке автомобильного колеса). Как показывает анализ, в образованной таким способом магнитной яме плазма оказывается устойчивой относительно обычных магнитогидродинамических неустойчивостей. Остающиеся моды более высоких порядков, по-видимому, развиваются слабо и не вызывают повышенной диффузии. В расплату за эти достоинства приходится отказаться от стационарного режима работы и перейти на длинные импульсы, отсюда — трансформатор.

В настоящее время есть большие надежды на то, что «токамаки» продемонстрируют принципиальную возможность постройки управляемого термоядерного реактора. В наибольшей из действующих установок этого типа (Т-3 в Институте им. И. В. Курчатова), большой диаметр тора — 2 м, диаметр плазменного шнура около 0,3 м, максимальное поле $B_\phi = 3,5$ тл и ток $I_\phi \sim 10^5$ а. Наградой за эти параметры были следующие результаты⁷: плотность плазмы $3 \cdot 10^{13}$ см⁻³, время удержания $\tau_c \sim 0,03$ сек, электронная температура > 1 кэв, ионная температура 0,5 кэв. Каждая из этих цифр (а они были измерены как советскими учеными, так и группой приглашенных физиков из Англии) приблизительно в десять раз меньше, чем нужно, однако они очень хороши по современным стандартам, и это еще не все. Из уравнений (1)–(3) находим $A \sim 80$, т. е. время удержания 0,03 сек примерно в 80 раз больше времени, соответствующего бомовскому коэффициенту турбулентной диффузии. Это говорит о том, что плазма весьма спокойна и почти пригодна (с этой частной точки зрения) для термоядерного реактора. В меру оптимистически настроенный специалист мог бы спорить, что лишь из-за небольших размеров и относительно низких магнитных полей не удастся удерживать плазму столько секунд, сколько нужно. Выяснение того, позволит ли увеличение размеров и магнитного поля вплотную приблизиться к параметрам термоядерного реактора, составляет сейчас одно из наиболее интригующих направлений исследования: следующее поколение экспериментов должно сказать многое.

Аналогичным образом можно было бы дать описание некоторых экспериментов с магнитными зеркалами (например, так называемой установки 2Х в Лоуренсовской радиационной лаборатории в Ливерморе *) или с плазмой, получающейся при ударном нагреве (например, установки «Сцилла» в Лос-Аламосе⁸).

Эта последняя установка очень схематично показана на рис. 5. Разряд конденсатора через одновитковую обмотку создает быстро нарастающее сильное магнитное поле ($< 10^{-6}$ сек, 15 тл). Магнитное поле действует как радиальный поршень и, сжимая первоначально холодный ионизованный газ, превращает его в плотную, горячую плазму. Каждая из этих разнообразных систем характеризуется различными комбинациями плотности, температуры и времени удержания. В экспериментах на «Сцилле» мы встречаемся с плотностью, достигающей $5 \cdot 10^{16}$ см⁻³, и температурой

*) Хороший обзор на эту тему⁸.

~ 5 кэв. Этого почти достаточно для реакций слияния, однако время $\tau_c \approx 10^{-5}$ сек очень мало: плазма быстро выплескивается через открытые торцы. Для уменьшения влияния торцов сейчас строится более длинная установка («Сциллак», 10 м).

3. ОБЩИЕ ВОПРОСЫ ПРАКТИЧЕСКОГО ОСУЩЕСТВЛЕНИЯ

Предсказания физики плазмы могут подтвердить или опровергнуть принципиальную возможность получения полезной энергии в результате управляемого термоядерного синтеза, но они не могут дать определенных

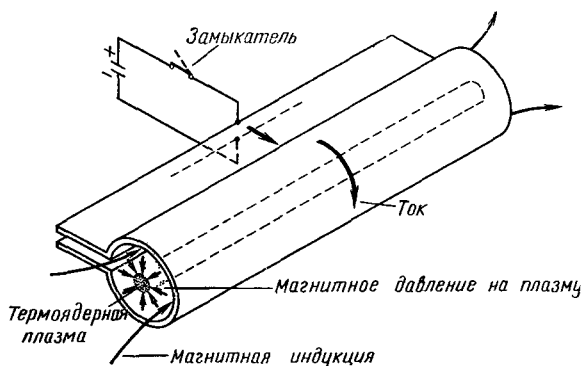


Рис. 5. Схема импульсного нагрева и удержания плазмы (так называемый θ-пинч).

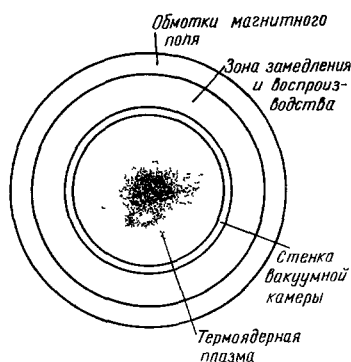


Рис. 6. Схематическое изображение управляемого термоядерного реактора.

гарантий. Существуют прикладные аспекты проблемы, которые в значительной степени не зависят от выбора конкретной геометрической модели:

1) Параметры плазмы в воображаемом действующем реакторе; к ним относятся: температуры ионов и электронов; доля ядерного топлива, выгорающая при одном цикле прохождения через реактор; излучение с поверхности плазмы. Все это можно было бы назвать «плазменной технологией».

2) Регенерация трития (для реактора на D — T) путем использования быстрых (14,1 Мэв) нейтронов в окружающей реактор замедляющей оболочке.

3) Выделение тепла, температура замедлителя и вакуумных стенок, съем тепла.

4) Создание сильных магнитных полей в больших объемах и конструкций, рассчитанных на большие усилия.

5) Радиационные повреждения, вызываемые 14,1 Мэв-ными нейтронами; их следствием могут быть частые и дорогостоящие замены многих элементов конструкции.

6) Размеры и цена, которые молчаливо подразумевались во многих из перечисленных пунктов. Ряд других вопросов зависит от конкретного типа модели; идеи некоторых устройств, по-видимому, еще требуют дополнительного развития. Перечень получился бы длинным.

Большую часть инженерных проблем, не зависящих от типа установки, можно иллюстрировать с помощью рис. 6, на котором термоядерный реактор схематично представлен набором концентрических цилиндров. Основное удерживающее магнитное поле направлено внутрь (или наружу) перпендикулярно плоскости рисунка; в данном случае не существенно,

является ли цилиндр центральным участком ловушки с магнитными зеркалами, или он свернут в тор. Термоядерная плазма занимает центральную часть вакуумного объема; она окружена зоной замедления нейтронов и регенерации трития, и на еще большем радиусе, катушками, создающими магнитное поле. Остановимся теперь на некоторых общих замечаниях, относящихся к перечисленным выше вопросам, имея в виду главным образом стационарные (или квазистационарные) установки^{5, 10}.

а) П л а з м а. Как нагревать плазму? Каковы равновесные температуры и другие параметры? Поскольку удержание плазмы не совершенно, будем предполагать, что плазменное топливо непрерывно теряется, уходя через торцы или на боковые стенки, и откачивается каким-то подходящим для этой цели насосом; в то же время идет воспроизводство плазмы в центре за счет некоторого процесса инжекции. Таким образом, плазма продолжает существовать, несмотря на то, что каждый ион или электрон удерживается только в течение времени τ_c , о котором говорилось выше. Ядра гелия, рождающиеся в процессе реакций слияния, также захватываются и удерживаются в течение времени $\sim \tau_c$, передавая плазме большую часть (возможно, всю) своей энергии (3,5 Мэв). Таким образом, плазма, по крайней мере частично, нагревается за счет протекающих в ней реакций. Итак, при данном τ_c необходим приток плазмы, обеспечивающий постоянный уровень плотности. За один цикл прохождения через реактор некоторая часть f_v топлива будет выгорать, а гелий, образующийся в результате реакций слияния, будет нагревать электроны и ионы (по-разному) до температур T_e и T_i соответственно. С ростом τ_c величины f_v , T_e и T_i также будут возрастать, топливо удерживается лучше и слабее разбавляется притоком непрореагировавшей плазмы. Коэффициент выгорания f_v может служить более наглядной характеристикой, чем τ_c . Трудности возобновления термоядерной плазмы, по-видимому, накладывают ограничение: $f_v \gtrsim 0,02$; при $f_v > 0,1$ температура плазмы оказалась бы слишком высокой и потребовалось бы немыслимо хорошее удержание. При некоторых довольно строгих предположениях все это можно рассчитать. На рис. 7 показано ожидаемое увеличение электронной и ионной температур с ростом коэффициента выгорания для типичных условий, ожидаемых в термоядерном реакторе. При больших f_v электронная температура становится меньше ионной. Это происходит потому, что, во-первых, быстрые электроны излучают энергию, а во-вторых, если температура электронов становится выше приблизительно 33 кэв, ядра ^4He передают энергию преимущественно ионам.

Являются ли эти температуры (однажды установившиеся после какого-то запуска) достаточно высокими, или необходимо вводить дополнительную энергию? Этот вопрос является ключевым при определении энергетического баланса термоядерного реактора. При заданном давлении плазмы наибольшей скорости протекания реакций синтеза в единице объема соответствует температура от 15 до 20 кэв. Как видно из рис. 7, нагрев становится достаточным при $f_v \gtrsim 0,03$. Для тороидальных систем это положение можно считать удовлетворительным, тогда как для открытых систем (магнитных зеркал) возникает дополнительная проблема: из-за рассеяния ионы будут уходить через торцы недопустимо быстро, если только их температура не достаточно велика (вероятно, 100 кэв или выше). Для ловушки с магнитными зеркалами нагрев ионов (вероятно, инжектирование в плазму частиц с большей энергией), по-видимому, является необходимой и дорогостоящей процедурой. Затраты связаны и с дополнительным оборудованием, и с добавочной энергией. Большая часть энергии реактора на D — T будет выделяться в виде тепла и может быть превращена в электрическую с коэффициентом полезного действия

(самое большое) около 50%. Поэтому большие затраты электрической энергии на инжекцию ионов могут сделать систему экономически невыгодной. Эти препятствия достаточно серьезны, и поэтому для ловушек с магнитными зеркалами исследуется совсем другой энергетический цикл¹¹. Картина силовых линий установки с таким циклом показана условно на рис. 8. Плазма, вытекающая через магнитное зеркало (показан только один торец), расширяется в радиальном направлении к краям большого диска, где плотность ее становится настолько низкой, что появляется возможность с большой эффективностью рекуперировать энергию плазмы, используя прямое электростатическое преобразование. Эта энергия (также

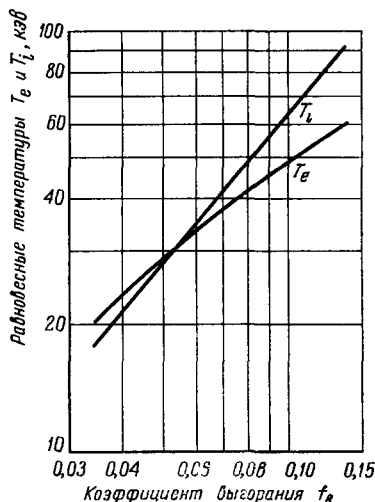


Рис. 7. Зависимость средних энергий (выраженных через температуры электронов T_e и ионов T_i) в гипотетическом термоядерном реакторе от отношения f_b использованного ко всему инжектируемому топливу.

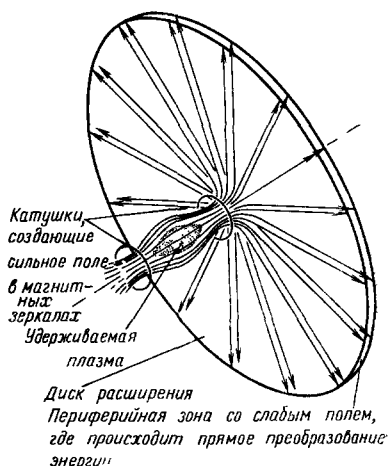
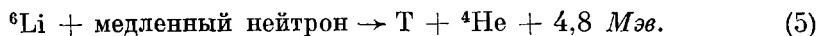
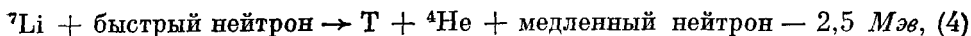


Рис. 8. Конфигурация магнитного поля для прямого преобразования электрической энергии в термоядерной установке с магнитными пробками¹¹.

с большим к. п. д.) используется для повторной инжекции ионов. Рассмотренная схема не будет достаточно эффективной, если используются реакции $D - T$, однако для реакций $D - {}^3\text{He}$, продуктами которых почти целиком являются заряженные частицы, эффект может быть значительней. Энергии ионов должны быть порядка нескольких сотен килоэлектрон-вольт, т. е. в 10 раз больше, чем при $D - T$ -реакциях. Если бы эта идея оказалась действенной, она позволила бы превратить необходимость в преимущество, хотя, по-видимому, и на этом пути возникают дополнительные трудности, преодоление которых пока представляется проблематичным. Тем не менее, с ней связаны серьезные надежды всего класса термоядерных установок с открытыми торцами. Основной недостаток всех этих расчетов состоит в том, что они все еще очень туманны. Неявные допущения могут при серьезном рассмотрении оказаться нереальными. Например, как будет влиять слабая турбулентность на скорость обмена энергией в плазме? Никто этого не знает. Изменятся ли кривые рис. 7, если учесть эффекты объемного заряда? Прежде чем приступить к осмысленному проектированию реактора, необходима еще детальная разработка «подземного горизонта» (если можно так выразиться) технологии термоядерной плазмы.

б) Р е г е н е р а ц и я т р и т и я. В реакторах на D — T необходимо регенерировать тритий; вполне подходящими являются для этой цели две следующие реакции на литии:



Общая идея, нашедшая свое отражение на рис. 6, состоит в том, чтобы сделать вакуумные стенки и конструкции, поддерживающие оболочку, из тонких секций тугоплавкого металла. Внутри должно будет находиться охлаждающее вещество — жидкий литий или литиевая соль, — а также специально введенный замедлитель нейтронов (вероятно, частично из графита). Из металлов наиболее подходящим является ниобий: он штампуются и сваривается, сохраняет механические свойства до 1000 °С и прозрачен для трития. Последнее качество дает двойную выгоду: тритий, образующийся в литиевом охладителе, не захватывается металлом и легко попадает в вакуумные регенерационные отсеки, диффундируя через тонкие стенки секций. Кроме того, в ниобии посредством реакций (n , $2n$) образуется некоторое дополнительное число нейтронов; с этой частной точки зрения, однако, лучшим материалом был бы молибден.

Достоинства охлаждения жидким литием — высокая теплопередача и малое количество, или даже отсутствие, нежелательных конкурирующих реакций на нейтронах; основной недостаток — высокая электропроводность, которая затрудняет его прокачку через сильные магнитные поля. Насколько он серьезен, еще не совсем ясно. Вблизи стенок вакуумной камеры, где большая скорость потока лития может приводить к очень большим потерям при прокачке, можно использовать непроводящую расплавленную соль. Наиболее вероятный кандидат — Li_2BeF_4 ; главная неприятие использования этого вещества связана с наличием фтора, который замедляет быстрые нейтроны, мешая тем самым протеканию выгодных реакций (4) на ${}^7\text{Li}$. Иными словами, использование Li_2BeF_4 затрудняет регенерацию достаточного количества трития. Тем не менее, используя любую из этих схем или их комбинацию, можно, по-видимому, обеспечить соответствующую регенерацию трития. Расчеты, основанные на полуреалистических предположениях относительно вакуумных стенок и зоны воспроизводства, показывают, что можно регенерировать от 1,1 до 1,5 ядра трития на каждый нейтрон, падающий на стенку вакуумной камеры¹². Так как на образование каждого нейтрона расходуется одно ядро трития, фактически мы получаем тритиевый размножитель — бридер, используя в качестве исходных материалов дейтерий и литий. На сопоставление под этим углом зрения термоядерных реакторов и атомных реакторов — бридеров на делении ранее не обращали большого внимания. Помимо благоприятного коэффициента размножения, несомненным достоинством является то, что загрузка трития в термоядерный реактор, как показывают сделанные оценки, должна производиться раз в несколько недель, а может быть, и реже¹³. Время удвоения тритиевого топлива в термоядерном реакторе может оказаться существенно меньшим одного года. Время удвоения — важная характеристика того, насколько быстро могут быть построены новые реакторы (т. е. обеспечены топливом) или удовлетворены растущие требования в энергии, или заменены ранее действовавшие энергоблоки. Короткое время удвоения в термоядерных реакторах выгодно отличает их от бридеров на реакциях деления, для которых время удвоения очень велико (в некоторых конструкциях ≈ 20 лет). В этом заключается одно из существенных ожидаемых преимуществ термоядерного синтеза.

Приблизительные размеры термоядерного реактора, как мне кажется, можно получить непосредственно из следующих соображений. Достаточно простые расчеты показывают, что зона воспроизводства плюс радиационный экран (не показанный на рисунке) для защиты внешних обмоток должны иметь толщину от 1,2 до 2 м. Такая значительная толщина подразумевает не только существенную стоимость зоны воспроизводства, но и очень высокую цену магнитного поля, которое должно будет заполнить очень большой объем. Единственный способ заставить систему окупить эти расходы, состоит в том, чтобы вырабатывать большое количество энергии, но почти вся эта энергия должна передаваться вакуумным стенкам или проходить через них. Технические пределы плотности энергии и теплопередачи определяют большие радиусы плазмы и вакуумной камеры, что-нибудь от 1 до 4 м. Таким образом, общие геометрические размеры будут большими, большой будет и полная мощность — почти наверняка более 1000 Мвт (электрическая), а может быть — 5000 Мвт.

в) В ы д е л е н и е т е п л а и в а к у у м н ы е с т е н к и. В основном три механизма обеспечивают перенос энергии, выделяющейся в вакуумных стенках, окружающих плазму: 1) часть быстрых нейтронов, проходя через стенки, испытывает в них неупругие соударения; 2) γ -лучи из глубины зоны воспроизводства светят на тыльную сторону стенок; 3) все электромагнитное излучение плазмы поглощается стенками. Сама плазма не дает дополнительной нагрузки на стенки, поскольку предполагается, что она каким-то образом откачивается. Три перечисленных механизма могут привести к выделению на стенках от 10 до 20% полной мощности реактора. Это довольно умеренная часть, однако вакуумные стенки тонки, а выделение (и съем) тепла на единицу объема определяет энергетические возможности всей системы. В этом кроется недостаток термоядерных установок по сравнению с реакторами деления; в последних энергия более равномерно выделяется во всем объеме реактора и не должна вся проходить через какой-то критический участок.

С этой точки зрения, как мне кажется, полное выделение энергии не должно быть больше 15 Мвт на квадратный метр поверхности вакуумных стенок, а скорей это будет 10 Мвт/м², при условии, что через стенки проходят 14 Мэв-ные нейтроны, образующиеся при синтезе, а вклад в остальную часть дают электромагнитное излучение и нейтроны, захваченные ⁶Li. Некоторые ¹⁴ считают допустимыми гораздо большие потоки энергии при использовании специальных теплоотводящих стенок — от 30 до 40 Мвт/м², однако эта конструкция весьма проблематична. Как уже говорилось выше, полная мощность реактора, соответствующая 15 Мвт/м², очень велика. Если радиус вакуумных стенок будет равен всего 2 м, то система типа рис. 6 будет производить 140 Мвт тепловой мощности на погонный метр цилиндра (в направлении, перпендикулярном плоскости рисунка). Если же система свернута в тор, то его большой радиус едва ли может быть меньше 20 м. Полная тепловая мощность такой установки была бы 12 000 Мвт, а электрическая — 5000—6000 Мвт, что в несколько раз превосходит мощность крупнейших из существующих электростанций.

Единственный выход ¹⁵ из этого, а также некоторых других затруднений заключается в существенном снижении тепловой нагрузки до приблизительно 2 Мвт/м². Полная мощность уменьшается до более удобной величины, а поскольку снижается плотность плазмы, уменьшается магнитное поле и его стоимость. Улучшается также положение с нейтронными повреждениями (см. ниже). Приведет ли этот путь к существенному увеличению стоимости на единицу мощности, пока что трудно сказать из-за отсутствия необходимых оценок.

Вакуумные стенки должны выдерживать давление приблизительно в 1 атм; это не такая простая задача, если учесть, что материал должен быть тонким, а размеры весьма велики. Однако предварительные расчеты показывают, что объемные конструкции из тонких листов (по типу коробок из рифленого картона) будут иметь необходимую прочность и обеспечивать наличие каналов для протока охлаждающих веществ¹⁶.

г) **Обмотки магнитного поля.** Создание постоянного магнитного поля даже в 15 тл (150 000 гс) не представляет проблемы; сверхпроводящие обмотки легко решают задачу при сравнительно низкой стоимости; в этом отношении достигнут колоссальный прогресс по сравнению с состоянием десятилетней давности. Проблему составляют размеры: разрывное усилие, действующее на витки простого соленоида, создающего поле 15 тл, соответствует магнитному давлению 900 атм. Для сравнения отметим, что находящиеся под давлением камеры современных реакторов деления меньше тех, о которых здесь идет речь, а предельное рабочее давление в них не превышает приблизительно 40 атм. Ситуация усугубляется еще и тем, что магнитное поле не является простым соленоидальным и возникают усилия, которые не могут быть сведены к простому радиальному растяжению и сдерживаться обручами. Можно гарантировать, что при механическом разрушении обмоток радиоактивный выброс не угрожает, хотя экономический крах при этом неизбежен. Может быть, поля в 15 тл и не понадобятся, но уверенности в этом пока нет.

Почти все проекты предполагают наличие сверхпроводящих обмоток с температурой 4 °К или, в крайнем случае, обмоток с криогенным охлаждением до 10—20 °К. Именно по этой причине обмотки размещаются за зоной воспроизводства и за радиационным экраном, в противном случае проблема охлаждения стала бы неразрешимой. Задача создания силовой конструкции, работающей в условиях столь низких температур и при тех размерах и усилиях, о которых говорилось выше, еще ждет своего решения. Титан достаточно прочен при таких низких температурах, но он, как и большинство других материалов, при этих условиях очень хрупок.

д) **Повреждения нейтронами.** Эта проблема очень серьезна для реакторов как синтеза, так и деления. С одной стороны, термоядерный синтез обладает существенным недостатком. Действительно, при одной реакции деления выделяется 200 Мэв и образуется около 2,5 нейтрона, каждый с энергией, не превышающей приблизительно 2 Мэв. При одной реакции слияния выделяется 17,6 Мэв, причем из них 14,1 Мэв приходится на один быстрый нейтрон. Таким образом, отношение «быстрый нейтрон/вт» для синтеза на порядок величины больше, чем для деления, соответственно выше и структурные повреждения, вызываемые этими нейтронами. Для тех высоких уровней мощности, о которых говорилось в приведенных выше примерах, каждый атом металла вакуумной стенки испытывал бы около одного смещения за день¹⁷. Многие из этих смещений компенсировались бы отжигом, обусловленным высокой рабочей температурой, однако даже при самом тщательном выборе материалов, конструкции и температуры долговременная устойчивость вакуумных стенок к нейтронным повреждениям составит одну из главных проблем, с которыми столкнется развитие термоядерной энергетики.

Если же взглянуть на проблему с другой стороны, то синтез имеет несомненное преимущество. В термоядерных реакторах большой мощности ожидаемая величина повреждающего нейтронного потока составляет около $10^{15}/\text{см}^2\text{сек}$, тогда как в упоминавшихся типах реакторов деления

на быстрых нейтронах (бридерах) с жидким металлом соответствующие потоки на порядок величины выше. Здесь мы сталкиваемся с «принципом сохранения неприятностей» — топливные элементы бридеров на быстрых нейтронах, а возможно, и элементы конструкции будут требовать частой и весьма дорогостоящей замены. Для синтеза эта проблема переходит в проблему либо защиты вакуумных стенок (путем снижения мощности?), либо замены их. Стоимость любой из этих мер может оказаться высокой, остаются открытыми вопросы: окажутся ли расходы на замену вакуумных стенок значительно меньшими, чем полная стоимость реактора, и как часто потребуются замены?

В заключение рассмотрения проблемы нейтронных повреждений отметим, что ожидаемые в термоядерных реакторах условия и материалы отличаются от тех, которые представляют интерес для бридеров деления. Более того, ни один из существующих источников 14 Мэв -ных нейтронов (для испытания возможных устройств) не обладает достаточной интенсивностью, она меньше приблизительно в 1000 раз.

В рамках нашего обзора термоядерных систем невозможно было обойти проблему повреждений; относительно нее нельзя сделать надежных предсказаний, основанных на имеющихся знаниях; в то же время она существенно влияет на возможность постройки термоядерного реактора по любой схеме.

е) Р а з м е р ы и с т о и м о с т ь. Выше было показано, что при минимальной стоимости энергии размеры получаются большими. Однако опыт многих десятилетий свидетельствует, что размеры отдельных энергоблоков увеличиваются в 2—3 раза через каждые 10 лет. Возможно, что к 2000 г., когда термоядерный синтез, если ему повезет, претворится в жизнь, тепловая мощность $10\,000\text{ Мвт}$ окажется вполне приемлемой.

Стоимость киловатта тепловой энергии является разумной мерой для сравнения с другими энергопроизводящими системами. Элементы, условно показанные на рис. 6, эквивалентны сердечнику атомного реактора деления без некоторых вспомогательных устройств (и без всех турбин и генераторов электростанции). Пока нельзя назвать сколько-либо определенной цены для каждого из указанных на рисунке элементов: слишком многое еще неизвестно. Однако предельные оценки производились и показали, что стоимость киловатта тепловой энергии может быть от 6 до 20 долларов по курсу 1970 г.⁵ Если повреждения, обусловленные нейтронами, не потребуют слишком частой замены элементов конструкций, то в целом диапазон цен представляется интересным, а его нижний предел, несомненно, привлекательным.

Эти цены стимулируют продолжающееся развитие всей проблемы управляемого синтеза, хотя они и являются весьма эфемерным показателем, зависящим от несовершенства и изменчивости состояния дел. Конструкции, стоимости, тенденции и сопоставления должны постоянно подвергаться переоценкам.

4. ПРОБЛЕМЫ, ЗАВИСЯЩИЕ ОТ ТИПА УСТРОЙСТВА

Что можно сказать о характере зависящих от типа модели проблем, которые более специфичны, чем перечисленные выше? Я упомяну только три из них, чтобы показать, какого рода эти проблемы и сколь они важны.

а) И н ж е к ц и я т о п л и в а в з а м к н у т ы е т о р о и д а л ь н ы е с и с т е м ы. Плазма теряется за счет диффузии к вакуум-

ным стенкам, а затем поглощается (нетривиальная задача и не очень понятная) в специальной периферийной области. Подтекст этой фразы заключается в том, что каким-то образом происходит возобновление плазмы в центре камеры или около него (если установка работает в режиме, близком к стационарному). Ионизованные частицы не будут идти поперек удерживающего магнитного поля, поэтому необходимо как-то инжектировать нейтральные частицы. Беда в том, что плотность потока энергии (заключенной в горячих электронах) в плазме составляет около 10^{14} *вт/м²*; это что-нибудь в 10^3 раз больше аналогичной величины в самых мощных из имеющихся сегодня электронных пучков. Время жизни одного атома, или небольшой группы атомов, относительно ионизации в этом враждебном окружении составляет около 10^{-7} *сек*; верхний предел скорости инжектируемых атомов — приблизительно 10^6 *м/сек*, в противном случае будет нарушен энергетический баланс плазмы. Следовательно, атом пройдет, может быть, 0,1 *м*, т. е. ничтожную долю пути, который ему нужно было бы пройти к центру.

Другая возможность состоит в инжектировании настолько больших шариков, чтобы они экранировали сами себя, подвергаясь обдиранию по пути к центру (подобно ракете, проходящей через атмосферу при возвращении из космического полета). Расчеты того, что при этом происходит, — например, должен ли шарик быть настолько большим, чтобы вызвать затухание термоядерной реакции, — во много раз сложнее расчетов, относящихся к судьбе тел, влетающих в атмосферу, и еще очень мало сделано в этом направлении¹⁸.

б) Прямое преобразование энергии для открытых систем. На необходимость инъекции быстрых частиц и прямого преобразования энергии частиц в электричество обращалось внимание при обсуждении рис. 8. Обстоятельство, которое нельзя наглядно проиллюстрировать, состоит в том, что диаметр дисковой области расширения может быть в 100 раз больше диаметра области удержания в самой ловушке. Можно ли изготовить такую конструкцию (хотя бы и со слабым магнитным полем) при сравнительно небольших затратах? Удастся ли достаточно хорошо контролировать устойчивость плазмы и орбиты отдельных частиц во всей этой огромной области? Никто этого не знает!

в) Быстрые импульсные системы. Установки типа рис. 5 имеют преимущества автоматического нагрева плазмы, по-видимому, хорошей устойчивости относительно радиальных смещений, а также ряд других. Однако и здесь возникают свои на первый взгляд неразрешимые осложнения: а) Для этих систем необходимо, чтобы за время около 10^{-6} *сек* в катушку вводилось значительное количество запасенной энергии.

В настоящее время для этого используются конденсаторы, стоимость которых составляет что-нибудь 100 000 долларов на мегаджоуль. Разумеется, возможно некоторое уменьшение этой цены, а нужно, чтобы оно было очень большим. б) Для получения быстрых импульсов необходимо, чтобы катушка, создающая поле, была как можно ближе к плазме, т. е. служила одновременно стенкой вакуумной камеры. Следовательно, катушка должна обладать большой прочностью при высокой температуре. Электрические потери в ней уменьшают энергетический выход всей системы. Нейтроны будут замедляться и поглощаться, проходя через катушку, и это уменьшит выход трития¹⁹. в) Импульсный режим работы при давлении (скажем) 900 *атм* в микросекундном диапазоне усугубляет проблему механических аварий, а введение усиливающих конструкций нанесет еще больший ущерб воспроизводству трития.

5. БЕССТРАШНЫЙ ПРОГНОЗ

Оценка относительных достоинств различных подходов к управляемому термоядерному синтезу — дело трудное и спорное. Однако время от времени необходимо бросать взгляд на перспективы. То, о чем будет говориться, отчасти — мнение, отчасти — факты; это не выражение чьей-нибудь политики, а моя собственная точка зрения.

Рис. 9 поможет нам ограничить и сконцентрировать обсуждение. Посредине находится уровень достижений, названный «физическая осуществимость»: производство плотности на время — 10^{13} сек/см³ или больше

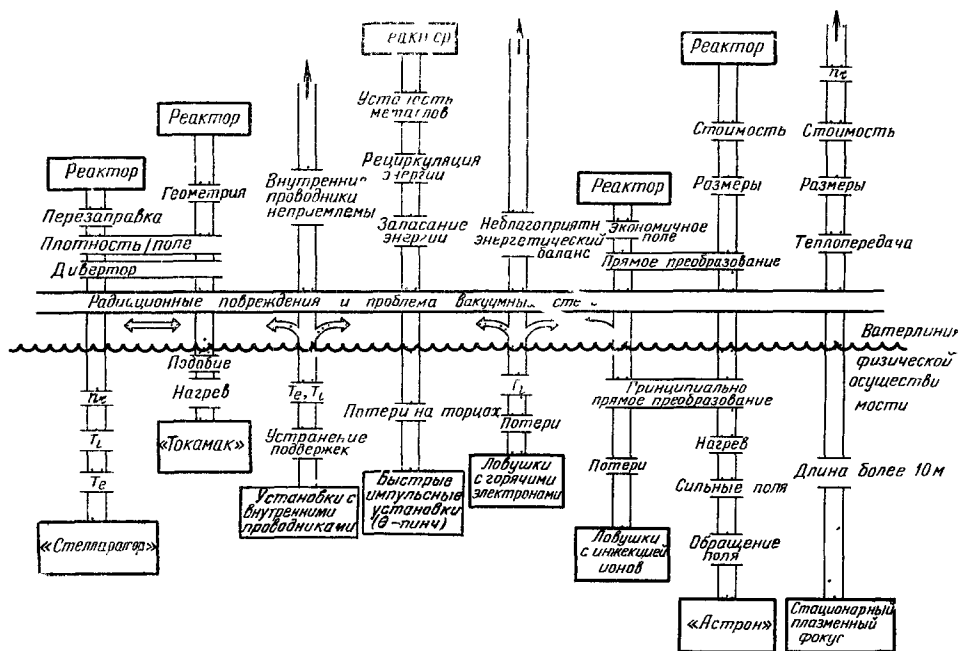


Рис. 9. Различные пути к успешному осуществлению управляемого термоядерного синтеза с препятствиями.

и реальная термоядерная температура — 15 кэВ или больше в зависимости от типа исследуемой системы. При этом совершенно не важно, будет ли установка похожей на будущий термоядерный реактор. Состояние на этом уровне было бы, грубо говоря, аналогичным постройке реактора деления в Стагфилде в 1942 г., когда физика дала положительный ответ, а техника и экономика еще должны были возникнуть. На рис. 9 нет абсолютной шкалы, а просто показано, где находится в настоящее время каждая из существующих систем — все они сейчас ниже ватерлинии осуществимости. Ближайший к ней — «Токамак», однако на рисунке показаны два разрыва, которые еще предстоит пересечь. Эти разрывы — то, что еще не известно: даст ли переход к большим размерам ожидаемый эффект (о чем говорилось выше) и удастся ли достаточно нагреть ионы в этой установке, используя слабую турбулентность или какие-то другие средства? Чтобы нанести реперную точку на все это, я готов поставить умеренное количество (хотя бы) денег на успех «Токамака» в течение нескольких следующих лет.

«Стелларатор» представляет собой родственную стационарную установку, в которой торидальная конфигурация стабилизируется не инду-

цированными плазменными токами (как в «Токамаке»), а дополнительными спиральными обмотками, уложенными по периферии тора. Большим преимуществом «стелларатора» является стационарный режим работы. Основной недостаток состоит в том, что получающаяся конфигурация магнитного поля, по-видимому, обеспечивает худшее удержание. Поэтому необходимо более существенное улучшение произведения плотности на время (на рисунке — nt); кроме того, труднее увеличить как ионную T_i , так и электронную T_e температуры²⁰. В настоящее время «Стелларатор» находится значительно ниже «Токамака».

Некоторые тороидальные системы удержания предполагают наличие жестких металлических проводников, целиком окруженных плазмой. Примером таких систем могут служить так называемые мультиполи в лабораториях «Дженерал атомик корпорейшн» и в университете Висконсина, а также «сфератор», разрабатываемый в Принстонской лаборатории физики плазмы²¹. Внутренние проводники могут быть сделаны (и действительно делаются) сверхпроводящими, поэтому возможна истинная левитация без всяких подвесок и поддержек, что и достигнуто практически. Однако экспериментов большого масштаба с использованием левитации в сильных магнитных полях еще не проводилось. Поэтому в третьей колонке рис. 9 указаны разрывы, соответствующие необходимости работать без поддержек и увеличению как T_e , так и T_i за счет каких-то, еще не совсем разработанных, способов нагрева плазмы.

Следующими на рисунке идут быстрые импульсные установки типа рис. 5. Являются ли поперечные потери уже теперь малыми и только уменьшение ухода через торцы уже обеспечит удовлетворительное удержание, — пока еще вопрос, но я трактую сомнения в пользу установок. Есть одна оценка: установка должна иметь длину 2 км, если она линейная и ее торцы не закупорены (а как их заткнуть?); если же она свернута в тор, возникают новые, нерешенные вопросы устойчивости плазмы.

Для всех открытых ловушек с магнитными зеркалами характерны большие потери через торцы, и способы их уменьшения (например, путем ввода высокочастотной энергии в магнитные зеркала), по-видимому, не очень эффективны*). Дополнительную проблему представляет адекватный нагрев ионов и электронов. В ловушках с «горячими электронами» с помощью микроволн большой мощности получается даже излишне плотная плазма с горячими электронами, которая, по-видимому, хорошо удерживается²³. Ионы можно было бы нагревать (разрыв T_i на рис. 9), инжектируя в эту исходную плазму быстрые нейтральные атомы. Шансы этой системы продемонстрировать физическую возможность получения термоядерной плазмы, по крайней мере, вполне приличные.

Зеркальные ловушки, в которые инжектируются ионы и плазма которых имеет не очень много горячих электронов, стоят перед большими трудностями. Потери велики, и, как говорилось выше, из-за этого, видимо, потребуется разработка «в принципе» прямого преобразования энергии, которое должно будет войти как принципиальная часть решения проблемы (см. снова рис. 8 и относящуюся к нему дискуссию).

Установка «Астрон» из Лоуренсовской радиационной лаборатории интересна, несмотря на трудность ее описания (рис. 10). Отправной точкой «Астрона» обычно является ловушка с магнитными пробками (см. рис. 3), однако вместо того, чтобы непосредственно удерживать плазму, ставится задача удерживать кольцо из быстрых релятивистских электронов (в «настоящем» реакторе — из релятивистских протонов). Это кольцо

*) Оптимистическое мнение относительно возможности применения электростатических полей для уменьшения ухода через магнитные зеркала можно найти в работе²².

получило название «Е-слоя»; при достаточной плотности электронов диамагнетизм кольца должен вызвать изменение направления магнитного поля внутри и там должна была бы образоваться новая конфигурация замкнутых силовых линий магнитного поля — тор внутри ловушки с магнитными зеркалами, — которая удерживала бы термоядерную плазму. Пока что в экспериментах со слабыми полями наблюдалось незначительное диамагнитное уменьшение поля (а не изменение направления!) ²⁴. Чтобы получить требуемую магнитную конфигурацию, нужно будет добиться действительного обращения поля в установке больших размеров с сильным магнитным полем; кроме того, проблемой является нагрев

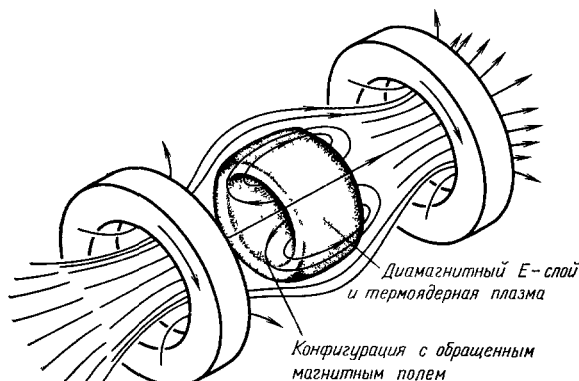


Рис. 10. Схема установки «Астрон» для управляемого термоядерного синтеза (идея состоит в создании сильно диамагнитной области внутри обычной ловушки с магнитными зеркалами).

(несколько кэв). Это — так называемый «плазменный фокус», который за характерное для него время импульсной работы (около 10^{-6} сек) служит обильным источником термоядерных нейтронов ²⁵. Удастся ли сформировать и сохранить этот очень динамичный объект на более стационарной основе, можно ли вытянуть его из жерла плазменной пушки, подобно нити с веретена? Никто не знает всех проблем, стоящих на этом пути, поэтому я произвольно отождествляю физическую осуществимость с созданием десятиметровой нити.

На эти разработки, лежащие ниже ватерлинии рис. 9, было потрачено почти все из более чем миллиарда долларов, израсходованных до настоящего времени в мире на термоядерный синтез. Однако как же обстоят дела с постройкой реактора? Выше ватерлинии возникают многие из рассмотренных нами ранее проблем. Повреждения конструкций быстрыми нейтронами могут превратить всю идею в экономически нецелесообразную, о чем говорилось выше. Кроме того, относительные достоинства разных систем ниже и выше ватерлинии различны.

«Токамаки» уже не выглядят больше такими привлекательными. Специальные плазменные насосы — так называемые дивергеры, — разработанные для стеллараторов, по-видимому, будут необходимы и для «токамаков» (доступ в которые намного труднее), причем их эффективность должна быть очень сильно увеличена. Из соображений устойчивости плазмы может потребоваться, чтобы плотность плазмы была неприемлемо низкой или чтобы магнитные поля были неприемлемо велики (от 15 до 20 тл и выше ²⁶). Помимо этого, геометрия, импульсный режим и, неизбежно, большие размеры установки сильно затрудняют обращение с ней.

плазмы, а большие потери через торцы могут потребовать прямого преобразования энергии.

Некоторые специалисты, в частности в СССР, отдают предпочтение «стационарному плазменному фокусу». Идея берет свое начало с открытия явления, состоящего в том, что у выходного торца коаксиальной плазменной пушки плазма может быть сфокусирована в тоненькую нить длиной несколько миллиметров, в которой достигаются очень большая плотность (10^{19} см⁻³) и высокая температура

Некоторые из этих проблем возникают и перед «стеллараторами», но в несколько более легкой форме. Стационарный режим работы — проще; дополнительная проблема перезарядки топливом представляется не более чем умеренно сложной. Таким образом, перспектива «стеллараторов» предпочтительней, если допустить, что управляемый синтез в них физически осуществим. Научные программы «токамаков» и «стеллараторов» в значительной мере поддерживают друг друга, отсюда — стрелка между ними на рис. 9.

Системы с внутренними проводниками просто не могут привести к постройке на их базе термоядерного реактора, поскольку нет способов охлаждения левитированного проводника, тем более, в термоядерной плазме. Это все хорошо понимают, и никто никогда не думал иначе; назначение этих экспериментов — в изучении физики плазмы, проливающим свет на другие системы.

Перед θ -пинчами стоят очень серьезные проблемы, о которых говорилось выше в конце раздела, посвященного быстрым импульсным установкам. Я весьма пессимистичен относительно их судьбы, что и отражено на рис. 9.

Ловушки только с горячими электронами представляются непригодными для термоядерного синтеза с точки зрения энергетического баланса, хотя и это — только личное мнение. Так же как в случае установок с внутренними проводниками, их назначение заключается в достижении ватерлинии, а не в постройке промышленного реактора. Кроме того, некоторый подогрев электронов, может быть, окажется полезным для менее экзотичных ловушек с магнитными зеркалами. Если обычные ловушки с магнитными зеркалами окажутся «физически» осуществимыми, то в соответствии с нашей градацией они будут наиболее вероятным кандидатом в термоядерные реакторы. Остаются вопросы: удастся ли создать систему прямого преобразования энергии за приемлемую стоимость; эффективным ли будет использование магнитного поля (т. е. будет ли оно достаточно дешевым) и, конечно, радиационные потери.

«Астрон», по-видимому, унаследует еще большие трудности: его размеры могут оказаться очень большими, и совсем не ясно, будет ли разумной стоимость сверхточных ионных пушек, рассчитанных на релятивистские энергии. Прямое преобразование энергии также остается проблемой.

Даже если удастся создать стационарный плазменный фокус длиной 10 м, сомнительно, чтобы на его основе можно было построить промышленный термоядерный реактор. Плотность энергии огромна, и, вероятно, понадобились бы чрезмерно большие магнитные поля для удержания плазменной нити. Можно ли будет когда-нибудь создавать их, не помещая катушки магнитного поля вблизи плазмы, что усугубило бы проблемы теплоотдачи и регенерации трития? Кроме этих, есть еще и другие проблемы.

На рис. 9 не представлены несколько действующих на совершенно ином принципе систем для достижения управляемого термоядерного синтеза; одна из них — так называемый «лазерный нагрев» — заслуживает упоминания²⁷. В этой системе импульс сверхмощного лазера фокусируется на маленьком шарике из твердой смеси дейтерия с тритием и нагревает его до термоядерных температур, прежде чем шарик успеет разлететься. Скорость разлета при термоядерных температурах составляет около 10^6 м/сек, а размеры шарика — порядка 1 мм. Таким образом, длительность основного нагревающего импульса должна быть меньше 10^{-9} сек. Более того, схема наиболее эффективного нагрева предполагает использование нескольких меньших по мощности импульсов предварительного подогрева, в задачу которых входит создание определенных

начальных градиентов плотности и температуры; точность синхронизации этих импульсов должна быть что-нибудь порядка 10^{-11} сек. Эти требования могут быть выполнены. По минимальным оценкам, необходимо приблизительно 10^5 дж для выхода на уровень энергетического баланса, когда энергия, выделяющаяся в результате синтеза, сравняется с энергией, вкладываемой в лазеры. Но даже эти большие цифры не кажутся нереальными. Что мне кажется наиболее трудным — это обеспечение того, чтобы выработка энергии была достаточно дешевой; для справки укажем, что $5 \cdot 10^7$ дж такого «взрывного» тепла, выделившегося, например, в литиевом охладителе, стоят около 0,01 доллара; можно ли будет, пользуясь столь дорогим и деликатным устройством, работающим в режиме периодически повторяющихся импульсов, достичь таких же результатов?

Чтобы получить ответы на многие из поднятых выше вопросов, потребуются специальные исследования термоядерных систем, их дальнейшее развитие и отработка соответствующей технологии. До настоящего времени эти отрасли были и пока остаются второстепенными по сравнению с исследованиями плазмы и развитием экспериментальных установок.

6. ШКАЛА И МАСШТАБЫ ВРЕМЕНИ

Современные водяные атомные реакторы высокого давления, или кипящие реакторы удовлетворительны только как промежуточные установки; если не будут найдены гораздо большие запасы урана, то относительно низкая тепловая эффективность и неспособность к достаточному воспроизводству топлива обрекают их на короткую жизнь в нашем обществе. Полная установленная мощность этих станций будет гораздо меньше, чем электростанций, работающих на обычном ископаемом топливе, и сожаления о них могут основываться только на каких-нибудь относительно ограниченных местных соображениях (например, на тепловых эффектах в Бискайском заливе). Эти слова ни в коей мере не следует воспринимать как отрицание законности местных интересов. Просто имеется в виду более широкая перспектива и больший масштаб времени. Настоящий вопрос касается второго поколения бридеров деления (например, жидкометаллических реакторов-размножителей на быстрых нейтронах или бридеров с расплавом солей) и их сопоставления с возможностями управляемого синтеза. Одно время считалось, что основной недостаток деления — нехватка ядерного топлива, из-за очень малого содержания урана в земной коре, тогда как дейтерий имеется в изобилии. Это не верно; имеются достаточные запасы ^{238}U и ^{232}Th , D или ^6Li , которых хватит на 10^8 или более лет жизни общества с высоким потреблением энергии. И что хорошо, для этих веществ не видно других конкурирующих способов использования.

Реальный вопрос: бридеры деления или бридеры синтеза (которые, как мы видели, должны будут размножать свой тритий) включают в себя практическую осуществимость, относительную стоимость, масштабы времени и другие сопутствующие факторы, причем все перечисленные пункты тесно связаны друг с другом? Мы обсуждали первый из этих пунктов и не будем возвращаться к нему в подробностях. Чтобы показать некоторые перспективы цен, отметим, что дополнительные расходы в 20 долларов на тепловой киловатт, т. е. удвоение упоминавшейся выше максимальной цены, — само по себе добавило бы меньше 2 долларов к среднемесячному счету семьи за электричество. Это не приглашение к бездумному принятию дополнительных расходов — ведь потребление электроэнергии растет и повышение расценок будет более ощутимым,

а способ выразить ту мысль, что если надеяться даже на умеренное повышение общественного благосостояния, можно будет позволить себе существенно изменить конструкцию реакторов (деления или синтеза) Эта точка зрения найдет свое отражение в последующих замечаниях.

В отношении масштабов времени действительно имеются некоторые недоразумения. Управляемый синтез не является альтернативой первого поколения бридеров деления, как это одно время считали. Вопрос в том, будет ли предпочтительней термоядерный синтез или какие-то бридеры деления второго поколения. По шкале времени события идут так: даже если физическая осуществимость будет продемонстрирована к 1975 г., фундаментальные исследования задач, лежащих выше ватерлинии рис. 9, займут еще несколько лет. После этого, по крайней мере, одна разведочная модель термоядерного устройства будет в центре нашего внимания до середины 80-х годов; затем опыт эксплуатации реакторов деления покажет, что время перезарядки топливом слишком велико, чтобы по их образцу можно было проектировать и строить промышленные электростанции. По моим предположениям, термоядерная энергия в ощутимых количествах будет вырабатываться к 2000 г., даже если окажется успешным продвижение по одному из путей рис. 9. Немногие оптимисты считают, что это будет 1990 г., пессимисты считают, что никогда.

Может показаться, что до пуска промышленных установок еще очень далеко, и это дает удобную отсрочку для принятия фундаментальных решений относительно общих вопросов осуществления и будущего термоядерного синтеза. На самом деле это не так: в игру вступают другие масштабы времени. Важный временной масштаб определяется тем обстоятельством, что существующие газодиффузионные заводы для обогащения урана закончат срок своей службы и могут прекратить существование примерно к 1990 г. Первое поколение бридеров деления начнет работать задолго до этого, однако новые большие газодиффузионные заводы еще будут необходимы. Вопрос состоит отчасти в том, должна ли замена быть промежуточной или рассчитанной на длительный срок работы, или вообще нужны какие-то другие решения. Так как речь идет о дорогостоящих (несколько миллиардов долларов) сооружениях и связанных с ними программах, необходимо, чтобы к 1980 г. было совершенно ясно, что надо строить. Для этого несколькими годами ранее нужно будет выставить по рангу все атомные энергосистемы. Таким образом, уже через несколько лет нужно будет принимать ответственные решения об относительных достоинствах и возможностях осуществления различных атомных энергосистем. Когда решения начнут претворяться в жизнь, будет очень трудно изменить ход событий — в движение придут большие экономические и интеллектуальные силы и обычно легче идти вперед спотыкаясь, чем возвращаться назад. По существу, управляемый термоядерный синтез уже сейчас должен стать объектом все более детальных технических оценок. Опоздать или проявить безответственность на этом поприще — значит рисковать остаться не у дел.

7. ВОПРОСЫ БЕЗОПАСНОСТИ

О содержании двух последующих разделов было написано много несусветной чепухи, напоминающей «Алхимику» Бена Джонсона.

Почти все сходятся на том, что наиболее существенная «атомная» опасность контролируемого синтеза связана с тритием. В термоядерной электростанции с тепловой мощностью 5000 Мвт через плазму должно будет циркулировать количество трития, соответствующее приблизительно 10^8 кюри в сутки при относительном выгорании 0,05; всего за сутки

будет выгорать $5 \cdot 10^6$ кюри. Каким же должен быть полный запас трития в системе? Это зависит от того, как быстро невыгоревший тритий может быть возвращен из плазменных насосов, а также от эффективности извлечения регенерированного трития из зоны воспроизводства. То небольшое, что сделано по проблеме откачки, позволяет надеяться, что время цикла прохождения от момента вытяжки из плазмы до повторной инъекции будет что-нибудь около суток. Для зоны воспроизводства проводился более тщательный анализ¹⁷, из которого следует, что возрожденный тритий в течение 10—20 дней, может быть, будет находиться где-то внутри огромной массы из литиевого охладителя, графита и остального. При относительном выгорании 0,05 эти два запаса приблизительно равны и в сумме соответствуют $2 \cdot 10^8$ кюри. Это огромная масса радиоактивного вещества, сравнимая (в кюри) с количеством наиболее опасного продукта деления ($\sim 10^8$ кюри, ^{131}I), которое, по-видимому, будет образовываться в таких же по размерам бридерах деления. На этом параллели в сравнении заканчиваются.

При той же активности в кюри излучение трития относительно мягче (средняя энергия 9 кэв; β^-), и он представляет собой газ со слабой биологической активностью. На этом этапе обсуждения опасности синтеза и деления, вероятно, находятся в отношении 1 : 10^5 ; с этой точки зрения реакторы синтеза могли бы размещаться повсюду без каких-либо дополнительных защитных оболочек¹⁷. Тем не менее, чрезвычайные меры осторожности все же должны быть предусмотрены.

Ситуация усложняется за счет опасностей, на оценку которых только недавно обратили внимание. Это — выделение трития в виде T_2O , утечки трития через элементы конструкции реактора и тому подобное²⁸. Что касается первого, то T_2O входит в жизненный цикл так же, как вода, и это значительно увеличивает относительную опасность. Второе обстоятельство связано со свойством водорода (а следовательно, и трития) очень легко, в гораздо большей степени, чем все другие элементы, диффундировать внутрь металлов и через них. Это не тот тип опасности, который может привести к атомной катастрофе, а скорей задача предотвращения радиоактивного загрязнения станции. Она может быть решена техническими средствами, например введением вакуумных барьеров на пути возможной миграции трития. Но какова будет их стоимость? Если стоимость термоядерной установки вместе со всеми защитными средствами окажется равной стоимости жидкометаллического бридера на быстрых нейтронах плюс стоимость вырытой в городе тщательно оборудованной шахты для его размещения, то от всех разрекламированных преимуществ безопасности термоядерного реактора ничего не останется. Проблемы миграции трития и очистки только теперь начали привлекать к себе внимание, и через несколько лет о них можно будет сказать гораздо больше. Пока, как мне кажется, термоядерный синтез сохранит свои существенные преимущества, которые можно было бы выразить в разнице цен от 10 до 20 долларов на киловатт тепловой мощности.

Другая «атомная» неприятность состоит в том, что быстрые (14 Мэв) нейтроны, образующиеся при синтезе, будут сильно активировать детали основных конструкций термоядерного реактора²⁹. Реакторы деления сталкиваются с такой же проблемой; так как опасности распространения радиоактивности в окружающую среду нет, то активация относится скорее к проблеме обслуживания реакторов, а не к их безопасности.

Что касается несчастных случаев, не связанных с «атомными» опасностями, то реакторы и синтеза, и деления, по-видимому, вполне надежны. В одних используются большие количества жидкого лития или расплава

солей, в других такие же количества жидкого натрия. Имеющиеся здесь опасности малы; вероятно, они меньше тех, которым подвергаются люди, живущие рядом с железными дорогами, по которым перевозится много самых различных грузов.

Дополнительная проблема, стоящая перед реакторами деления, — захоронение долгоживущих продуктов деления; однако преимущества, получаемые за счет этого синтезом, весьма незначительны, так как полная стоимость хранилищ, видимо, не будет слишком большой (в масштабах, о которых идет речь).

8. ДРУГИЕ ПРОБЛЕМЫ, СВЯЗАННЫЕ С РАЗМЕЩЕНИЕМ И С ТЕХНИЧЕСКИМ ПРОГРЕССОМ

Рассуждения о сравнении атомной энергии с энергией, получаемой от сжигания обычного топлива, часто ведутся с точки зрения того, какие электростанции надо строить в местах, удаленных от густонаселенных центров. Логический вывод обычно сводится к тому, что в удаленных местах должны быть резервированы площади, на которых будет размещено много атомных электростанций, и электроэнергия будет передаваться к промышленным центрам. Все это очень хорошо, однако своеобразный «закон» Саттона *) подсказывает, что здесь мы подошли к существу проблемы, возникающей повсюду. Большинство населения Соединенных Штатов и других развитых стран живет в городах. Предсказания потребностей энергии, например к 1980 г., меняются, но все они сходятся на том, что даже с учетом тенденции к росту потребления электроэнергии нужды в неэлектрических видах энергии превысят потребности в электроэнергии почти на порядок величины³⁰. Большая часть этой неэлектрической энергии необходима для транспорта. Но даже обогрев помещений, тепло для промышленных процессов и т. п. дают вклад, намного превышающий потребности в электроэнергии, и все это тепло сейчас поставляется за счет сжигания обычного ископаемого топлива. Таким образом, если придется заменить ископаемые топлива ядерными, атомные электростанции должны будут строиться в самих населенных центрах или рядом с ними. Обсуждавшиеся в предыдущем разделе вопросы, касающиеся безопасности и стоимости гарантирующих ее защитных средств, должны рассматриваться именно с этой точки зрения.

Анализ всех общественных затрат и выгод, связанных с развитием бридеров деления или станций на обычном топливе, очень сложен и находится пока что на примитивной стадии. Подключение к ним еще одного конкурента — термоядерного синтеза — только усложняет ситуацию. Можно ли ожидать, что усовершенствованные бридеры или термоядерные реакторы будут иметь хороший тепловой к. п. д. (?); некоторые считают, что он будет равен 50% или больше (по сравнению с 32% у существующих реакторов, 41% у действующих станций на обычном топливе и 50%, которые, может быть, будут получены у таких станций в будущем). Сторонники бридеров деления утверждают, что общие трудности размещения и общественные затраты для атомной энергии будут значительно меньше, чем для станций, работающих на обычном ископаемом топливе. Я разделяю это мнение, если учитывать все побочные расходы, — сейчас эти расходы ложатся на все общество и не оплачиваются компаниями, производящими энергию. Здесь имеются в виду проблемы серы, окиси азота и пыли, которые тяжелым бременем ложатся на всех нас; страна только приступает к решению этих проблем, и стоимость защитных средств очень велика.

*) Вилли Саттон на вопрос, зачем он грабит банки, ответил: «Потому что там лежат деньги».

Кроме того, надо учитывать много других факторов; вот некоторые из них. Открытая добыча угля на долгий срок выводит из строя большие участки земли. Глубокие угольные или урановые шахты — опасны; добыча лития также имеет свои проблемы. Любой реактор деления, расположенный на поверхности земли в городе, должен будет, по-видимому, иметь вокруг себя обширную зону отчуждения. Анализ показывает, что эта ценная земля может быть использована для сельскохозяйственных целей, весьма возможно, в сочетании с теплом, рассеиваемым реактором³¹. Однако, если даже эта земля не будет давать прямого экономического эффекта, какой же большой город не захочет иметь внутри себя участок с привлекательным видом? Трудно количественно оценивать такие социальные факторы, хотя несомненно — они весьма существенны: вспомните вид на серпантин из Кенсингтонского дворца в Лондоне. Размеры электростанции и соотношение между капитальными вложениями и стоимостью топлива могут и должны быть существенным фактором, определяющим правильную планировку городов, хотя до сих пор он и не принимался в расчет. Так, например, работа больших электростанций на дешевом топливе может быть организована так, что непиговая энергия будет очень дешевой (для некоторых потребителей бесплатная?). При таком положении в городах могут стимулироваться самые разнообразные виды деятельности и откроются новые жизненные перспективы. Хорошо известный эффект положительной обратной связи — чем больше размеры электростанции, тем дешевле единица электроэнергии и, следовательно, тем больше потребление и тем скорее идет процесс перехода промышленности на электричество, — заставляет постоянно оценивать возможности техники будущего. Например, может быть, проблему транспорта удастся решить на основе электричества?

Даже деление и синтез ни коим образом не являются взаимно исключаящими альтернативами. Они могли бы дополнять друг друга: можно ожидать, что при синтезе будет получаться большой избыток легко доступных нейтронов, а некоторые, привлекательные в других отношениях схемы бридеров деления выглядят сомнительными из-за слишком большого времени удвоения топлива³². Может быть, реакторы синтеза можно будет использовать для производства делящихся элементов, осуществив тем самым полезный симбиоз синтеза и деления?

Однако все сказанное выше еще не касается самых глубинных слоев проблемы. Если осмыслить важность того факта, что управляемый термоядерный синтез сможет навсегда удовлетворить наши потребности в энергии, то надо разобраться, какой же должна быть энергетическая политика. Очевидно, простое увеличение выработки энергии не является удовлетворительным решением и привело бы к дополнительным трудностям (так, например, летняя температура на улицах увеличивается из-за пользования кондиционерами). Может быть, надо уменьшить рассеяние энергии, улучшив теплоизоляцию помещений? Вероятно, следует исходить из какого-то принципа минимизации возрастания энтропии. В отношении использования обычного ископаемого топлива это представляется совершенно необходимым: можно ли, например, считать вполне удовлетворительным то, что при путешествии на реактивном самолете сжигается почти столько же топлива, как если бы каждый из пассажиров проехал это расстояние по отдельности в своем собственном автомобиле?

Это не пустые фразы: ведь если высокоскоростное междугородное сообщение перейдет от самолетов к туннельным видам транспорта, станет возможной замена энергии обычного ископаемого топлива атомной (электрической) энергией. И еще очень многое поставлено на карту; достаточно широких оценок перспективы еще не делалось, и нам совсем неясно,

какой должна быть эта энергетическая политика. Во всяком случае, к проблемам такого масштаба — а они действительно стоят перед обществом — нигде и никогда еще не применялся такой общий подход. Это замечание носит более общий характер и применимо не только к управляемому термоядерному синтезу; оно связано с тем, что представляется самой фундаментальной проблемой: как нам организовать себя для решения больших общественных задач? Однако это уже другая тема³³.

Именно в таком широком смысле управляемый термоядерный синтез будет или не будет осуществлен. Я убежден, что использование ядерного деления для электростанций в большинстве случаев окажется гораздо привлекательней, чем сжигание угля или нефти. Как видно из предыдущих разделов, я убежден также в том, что положение еще более улучшится, если освоение термоядерной энергии окажется успешным. Однако это пока надежды, а не твердо установленные факты.

Было бы неосмотрительным предсказывать исход событий; не все из разрабатываемых сейчас систем окажутся приемлемыми, и это пока дает возможность свободы выбора в технических оценках.

Кроме того, бывают сюрпризы, и не только неприятные, и мне вспоминается историческая параллель³⁴. В 1680 г. Христиан Гюйгенс решил использовать порох для мирных целей и тем навсегда облагоденствовать человечество; он поручил своему помощнику Денису Папину изобрести управляемую пороховую машину. После 10 лет трудных поисков Папину пришла в голову другая идея, о которой он так писал в своем дневнике:

«Поскольку у воды есть такое свойство, что небольшое ее количество, будучи обращенным в пар при нагревании, приобретает такую же упругость, какой обладает воздух, а при последующем охлаждении снова переходит в воду, так что не остается никаких следов упомянутой упругости, я пришел к выводу, что можно сконструировать водяную машину, в которой с помощью не очень сильного нагревания за небольшую цену можно получать такое хорошее разряжение, какое никакими средствами нельзя получить с помощью пороха».

Затем он изобрел паровой цикл с расширением и конденсацией, который сделал возможной промышленную революцию.

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. A. S. B i s h o p, Project Sherwood. The U. S. Program in Controlled Fusion, Reading, Mass., Addison—Wesley, 1958.
2. T. A l e x a n d e r, Fortune 81 (6), 94—97, 126, 130—132 (1970); T. K. F o w l e r, R. F. P o s t, Sci. Amer. 215 (6), 21 (1966).
3. D. J. R o s e, M. K l a r k, Jr., Plasmas and Controlled Fusion, Cambridge, Mass., M. I. T. Press. 1965 (имеется перевод с 1-го издания: Д. Р о у з, М. К л а р к, Физика плазмы и управляемые термоядерные реакции, М., Госатомиздат, 1963).
4. J. B. T a y l o r, Nucl. Fusion, Suppl. 2, 477 (1962).
5. D. J. R o s e, Nucl. Fusion. 9, 183 (1969).
6. Л. А. А р ц и м о в и ч и др., Nucl. Fusion, Spec. Suppl., 17 (1969).
7. Л. А. А р ц и м о в и ч и др., Письма ЖЭТФ 10, 82 (1969); M. J. F o r e s t et al., Nature 224 (No. 5218), 488 (1969).
8. T. K. F o w l e r, Nucl. Fusion 9, 3 (1969); F. H. C o e n s g e n et al., Plasma Physics and Controlled Nuclear Fusion Research (Proceedings of the Conference of IAEA), v. 2, Vienna, 1969, p. 225.
9. E. M. L i t t l e et al., ibid., p. 555; A. D. B e a c h et al., Nucl. Fusion 9, 215 (1969).
10. Nuclear Fusion Reactors (Proc. Brit. Nuclear Energy Soc. Conference on Fusion Reactors, United Kingdom Atomic Energy Authority (UKAEA), Culham Laboratory, September 17—19, 1969), ed. by J. L. Hall., J. H. C. Maple, Culham Laboratory, 1970.
11. R. F. P o s t et al., Preliminary Report of Direct Recovery Study, Report UCID-15650, LRL, Livermore, Calif., 1970.

12. D. Steiner, Neutronics Calculations and Cost Estimates for Fusion Reactor Blanket Assambles. USAAE Report ORNL-TM-2360, Oak Ridge National Laboratory, 1968; S. Blow et al., — ¹⁰, paper 5.5.
 13. A. P. Fraas, A Diffusion Process for Remorving Tritium from the Blanket of a Thermonuclear Reactor. USAAE Report ORNL-TM-2358, Oak Ridge National Laboratory, 1968.
 14. R. W. Werner, — ¹⁰, paper 6.2.
 15. A. P. Fraas, P. S. Pease, частные сообщения.
 16. A. P. Fraas, — ¹⁰.
 17. D. Steiner, *ibid.*, paper 5.4.
 18. D. J. Rose, On the Fusion Injection Problem, UKAEA Culham Laboratory, Technology Division Report, No. 82, 1968.
 19. C. J. Bell et al., — ¹⁰, paper 3.3; USAAE Report LA-DC-10618, Los Alamos Scientific Laboratory, 1969.
 20. M. A. Rothman et al., Phys. Fluids **12**, 2211 (1969).
 21. M. Yoshikawa et al., *ibid.*, p. 1926.
 22. A. A. Ware, J. A. Faulkner, Nucl. Fusion **9**, 353 (1969).
 23. R. A. Dandl et al., — ⁸, p. 435.
 24. J. W. Beal et al., *ibid.*, v. 1, p. 967.
 25. J. W. Mather et al., Phys. Fluids **12**, 2343 (1969).
 26. И. Н. Головин, Токамак как возможный термоядерный реактор, см. ¹⁰; A. Gibson, *ibid.*, paper 3.2.
 27. R. Holcomb, Science **167**, 1112 (1970).
 28. F. Morley, J. Kennedy, — ¹⁰, paper 1.3; A. P. Fraas, H. Postma, Preliminary Apraisal of the Hazards Problems of a D—T Fusion Reactor Power Plant. USAEC Report ORNL-TM-2822, Oak Ridge National Laboratory, 1970.
 29. D. Steiner (будет опубликовано).
 30. Summary Report: Use of Steam-Electric Power Plants to Provide Low-Cost Thermal Energy to Urban Areas. USAEC Report ORNL-HUD-14, Oak Ridge National Laboratory, 1970.
 31. J. A. Mihursky, Summary of Meeting on Beneficial Uses of Waste Heat (Oak Ridge, Tennessee, April 20—21, 1970).
 32. L. M. Lidsky, — ¹⁰, paper 2.2.
 33. D. J. Rose et al., The Case for National Environmental Laboratories. USAEC Report ORNL-TN-2887, Oak Ridge National Laboratory, 1970; Technol. Rev. **73** (6), 38 (April 1970).
 34. A History of Technology, v. 4, ed by C. J. Singer et al., L., Oxford Univ. Press. 1954—1958, p. 171.
-