

УДК 620.91

## О месте гибридных реакторов в энергетической системе мира

ГОЛОВИН И. Н.

Термоядерные реакторы с магнитным удержанием плазмы, как и реакторы деления, производят электроэнергию только в тепловом цикле. Но в отличие от реактора деления термоядерный реактор потребляет электроэнергию, расходуемую не только на вспомогательные нужды. В ряде схем целесообразно затрачивать на поддержание реакции значительную часть или всю электроэнергию, производимую термоядерной электростанцией. В последнем случае уже нельзя говорить об электростанции в обычном смысле слова, так как продукцией такого предприятия, продаваемой потребителю, является не электроэнергия, а плутоний или иной вид горючего, например водород или химические вещества, получаемые в интенсивных нейтронных полях. Термоядерные реакторы, содержащие вblankете уран или торий и производящие  $^{239}\text{Pu}$  или  $^{233}\text{U}$ , называют гибридными.

Термоядерные реакторы смогут занять важное место в энергетике только при условии, что их использование даст экономическую выгоду по сравнению с использованием одних реакторов деления.

Предварительные оценки капитальных затрат на сооружение термоядерных электростанций, сделанные в разных странах и наиболее подробно в США, показывают конкурентоспособность их с атомными электростанциями. Однако эти оценки останутся неполными и ненадежными до тех пор, пока не пройдет значительный период эксплуатации первых экспериментальных термоядерных реакторов. Может оказаться, что преимущества термоядерных реакторов перед ядерными (меньшая суммарная радиоактивность, ничтожная топливная составляющая стоимости электроэнергии, отсутствие необходимости в перевозках отработавшего го-

рючего на регенерацию для извлечения плутония, короткий период удвоения и др.) будут недостаточны для широкого промышленного применения их вследствие значительно большей сложности. Действительно, в ядерных реакторах нет таких дорогих и «нежных» частей, как, например, сверхпроводящие магнитные обмотки или инжекторы быстрых атомов. Однако, только сооружая и сравнивая в эксплуатации реакторы синтеза и деления, можно узнать, что превалирует: достоинства или недостатки. Поэтому необходимость сооружения экспериментальных термоядерных реакторов не вызывает сомнений.

### «Чистые» реакторы

**Стационарный реактор.** Наиболее похожим на реактор деления по эксплуатационным характеристикам и наиболее удобным для промышленного использования был бы такой реактор синтеза, в котором однажды зажженная термоядерная реакция продолжала бы «гореть» неограниченно долго при непрерывной подаче холодного топлива и при непрерывном отборе «золы» — гелия и протия. В принципе это возможно для классической или неоклассической модели удержания плазмы магнитным полем в замкнутых магнитных ловушках, когда в режиме газового blanketа при плотности около стенки газовой смеси дейтерия с тритием (DT), равной или большей плотности плазмы на оси ловушки, тяжелые примеси и гелий уходят наружу плазмы, а дейтроны и тритоны тем же механизмом трения подаются им навстречу внутрь плазмы. Однако этот режим еще не изучен экспериментально и подразумевается, что магнитная конфигурация существует стационарно. Для токамаков это означает, что

осуществлено стационарное поддержание тока в плазме.

Такой реактор, прежде всего стационарный реактор-токамак, был бы блестящим решением термоядерной проблемы. К сожалению, на пути к его созданию остается наибольшее число нерешенных принципиальных физических задач.

Главные из них:

1. Неизвестен закон экстраполяции  $n\tau_E$  к реакторным температуре и плотности плазмы ( $n \approx 3 \cdot 10^{13} - 3 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$ ,  $T \approx 10-20 \text{ кэВ}$ ) и потому неизвестно, каковы будут размеры реактора, напряженность магнитного поля и ток в плазме.
2. Неизвестно, как сохранить малое загрязнение плазмы примесями, осуществимы ли режим газового бланкета и иные средства удаления примесей из плазмы или преграждения им пути проникновения в плазму.
3. Есть только теоретические идеи стационарного поддержания тока в плазме токамака. Экспериментальная проверка их отсутствует. Третья задача не существует для стеллараторов. Первые две общие для любых замкнутых систем. Для открытых ловушек не решена только первая задача, а второй и третьей нет.

Если реактор-токамак работает циклами, в которых DT-смесь ионизируется, нагревается до зажигания, и горение происходит до тех пор, пока реакция не потухнет вследствие выгорания горючего или охлаждения плазмы накопившимися примесями, то вторая задача упрощается и не требует решения третьей задачи.

**Циклический реактор-токамак.** Создание такого реактора кажется наиболее простым, если благоприятен закон экстраполяции  $n\tau_E$ .

Рассмотрим, что дают различные законы экстраполяции  $n\tau_E$ . Наибольшее принципиаль-

но возможное значение  $n\tau_E$  дает неоклассическая теория. Однако теория устойчивости плазмы предсказывает развитие неустойчивостей в реакторных режимах. Есть теоретические соображения о том, что наилучшее возможное удержание соответствует  $\tau_E$  порядка ста бомовских времен. В качестве третьей возможной, хотя и необоснованной, экстраполяции можно взять одну из эмпирических зависимостей, проверенных в доступном на существующих установках диапазоне параметров. Эти три закона экстраполяции выражаются формулами

$$n\tau_E = \frac{1}{2} A^{1/2} T^{1/2} I^2 \text{ (неоклассика);}$$

$$n\tau_E = 0,7 \cdot 10^{-8} a I n \text{ (эмпирика);}$$

$$n\tau_E = 6,3 \cdot 10^{-7} a I n \frac{qA}{T} \text{ (сто бомовских времен).}$$

(Здесь и далее ток выражен в амперах, размеры в сантиметрах, температура и энергия в электронвольтах, время в секундах.) Обычно принимается, что для зажигания реакции нужно  $n\tau_E > 1,5 \cdot 10^{14} \text{ с/см}^3$ . Однако считая, что приведенные значения  $n$  и  $T$  означают средние по сечению плазмы значения, примем для зажигания  $n\tau_E = 3 \cdot 10^{14} \text{ с/см}^3$ , так как небольшие примеси или обостренные профили плотности и температуры уменьшают значение  $n\tau_E$  вдвое. Поэтому приведенные в табл. 1 значения  $I$ ,  $a$ ,  $V$ ,  $\Phi$  и  $P_T$  надо рассматривать как минимально возможные для каждого из законов экстраполяции. Обсудим цифры табл. 1.

**Неоклассика.** Если бы этот закон экстраполяции был справедлив, то на строящихся сейчас установках T-10 (СССР) и PLT (США) можно было бы осуществить зажигание, подняв ток в плазме до указанной в табл. 1 величины. При таких малых  $a$  и  $R$ , однако, нельзя окружить вакуумную камеру бланкетом и защитой сверхпроводящих обмоток. Увеличив  $a$  и оставив

Токамаки-реакторы с зажиганием ( $n\tau_E = 3 \cdot 10^{14} \text{ с/см}^3$ ;

$$A = \frac{R}{a} = 4; T = 15 \text{ кэВ}; \beta_\phi = 1; q = 2,2)$$

Таблица 1

Параметры	Неоклассика		Эмпирика		Сто бомовских времен	
Плотность плазмы $n$ , $\text{см}^{-3}$	$3 \cdot 10^{13}$	$1 \cdot 10^{14}$	$3 \cdot 10^{13}$	$1 \cdot 10^{14}$	$3 \cdot 10^{13}$	$1 \cdot 10^{14}$
Ток плазмы $I$ , МА	1,6	1,6	6,5	4,8	28	21
Радиус плазмы $a$ , м	0,5	0,3	2,2	0,9	9,5	3,8
Мощность реактора $P_T$ , МВт	2,2	1,7	180	140	10 000	7600
Объем плазмы $V$ , $\text{м}^3$	10	0,8	800	70	44 000	3700
Поток нейтронов $\Phi$ , $\text{см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$	$0,15 \cdot 10^{13}$	$0,07 \cdot 10^{13}$	$0,6 \cdot 10^{13}$	$0,26 \cdot 10^{13}$	$2,4 \cdot 10^{13}$	$1,1 \cdot 10^{13}$
Торoidalное поле $H$ , кЭ	53	97	53	97	53	97

$R/a$  и  $n$  неизменными, следует увеличить во столько же раз ток в плазме, чтобы сохранить равновесие плазмы. А это, в свою очередь, приведет к росту  $n\tau_E \propto I^2$ . При  $n\tau_E \gg 1,5 \cdot 10^{14}$  плазма термически неустойчива. Неизвестно, к чему может привести эта неустойчивость. Либо с ростом температуры и  $\beta_\phi$  потеря равновесия приведет к такому уменьшению  $n\tau_E$ , что термическая устойчивость автоматически установится, либо плазма перейдет в режим релаксации. Чтобы избежать этих неясных явлений, можно с начала нагрева плазмы примешать к ней примеси в таком количестве, чтобы  $n\tau_E$  не превышало значительно  $1,5 \cdot 10^{14}$  с/см<sup>3</sup>. Во всяком случае при неоклассическом удержании есть свобода выбора при конструировании реактора и вероятность того, что технически разумный реактор может быть создан в недалеком будущем, велика.

**Эмпирика.** Реактор получается внушительных размеров, но есть еще возможность, не выходя за пределы, доступные современной технике и технике ближайших десятилетий, увеличить его размеры в 2—3 раза, чтобы иметь некоторый запас в  $n\tau_E$  для обеспечения горения при поступлении примесей. Вероятность создания реактора в течение двух ближайших десятилетий меньше, чем в первом случае.

**Сто бомовских времен.** Размеры и ток плазмы столь велики, что увеличение их выходит за возможности, технически осуществимые в XX веке. Примеси для такого реактора очень опасны. Так, примесь в 7% гелия или 5% углерода заведомо потушат его. Заметим, кстати, что во всех экспериментах на токамаках плазма значительно грязнее, и мы еще не знаем, как ее делать чистой. Вероятность сооружения такого реактора в ближайшие десятилетия очень мала. Действительно, кроме трудностей, обусловленных размерами, и опасности примесей для такого реактора нагрев плазмы до зажигания представляет очень сложную задачу, так как в плазму должна в течение нескольких секунд вводиться мощность в сотни мегаватт. Высокочастотных генераторов с такими параметрами нет. Для нагрева инжекцией пришлось бы создать инжекторы с энергией атомов мегавольтового диапазона при токе в сотни ампер. Создание таких высокочастотных генераторов или инжекторов заняло бы многие годы.

Таким образом, если эксперименты подтвердят возможность удержания, близкого к эмпирической экстраполяции или даже лучшего, то циклический реактор с зажиганием осуще-

ствим средствами современной техники. В режиме беспрепятственного поступления примесей, или с дивертерами того типа, какие обсуждаются в литературе, — это плохой реактор, так как время накопления примесей, приводящее к потуханию реакции, и время выгорания горючего составляет в нем десятки секунд, а такие короткие циклы очень затрудняют создание экономически выгодных термоядерных электростанций.

В режиме газового blankets (если он осуществим) длительность рабочего цикла не лимитируется примесями или выгоранием топлива, которое подается просто в виде газа с поверхности плазмы. Длительность цикла, ограниченная изменением магнитного потока в индукторе, может достигать по крайней мере тысячи секунд. Такой реактор уже имеет перспективы промышленного применения.

Итак, если законы природы нам благоприятствуют и первые две задачи решаются успешно, то может быть создан циклический реактор-токамак. При тех же условиях стелларатор дает стационарный реактор. Вопрос о том, является ли стационарный реактор-стелларатор более выгодным решением, чем циклический реактор-токамак, требует подробного анализа. Обмотки стелларатора дороже, чем у токамака, но электростанция с токамаком удорожается его циклической работой по крайней мере за счет стоимости электротехнического оборудования, питающего индуктор. Циклическая работа токамака может стоить очень дорого, если первая стенка, подверженная сильным радиационным повреждениям, будет быстро разрушаться из-за термической усталости.

### Реакторы с инжекцией

Рассмотрим возможность создания реакторов, если вторая и третья задачи решаются успешно, а удержание оказывается плохим, т. е. хуже эмпирической экстраполяции. Прежде всего напомним, что третьей задачи нет для стеллараторов, а ни второй, ни третьей нет для открытых реакторов. Последующий анализ будет справедлив для всех трех вариантов: токамаки, стеллараторы, открытые реакторы. Уже неоднократно отмечалось [1—3], что даже при удержании плазмы с  $n\tau_E < 1,5 \cdot 10^{14}$  с/см<sup>3</sup> получение полезной энергии все же возможно в реакторах с инжекцией быстрых атомов.

Принципиальная схема электростанции с таким реактором изображена на рис. 1. В плазму реактора пучком атомов вносится мощность  $P_I$ .

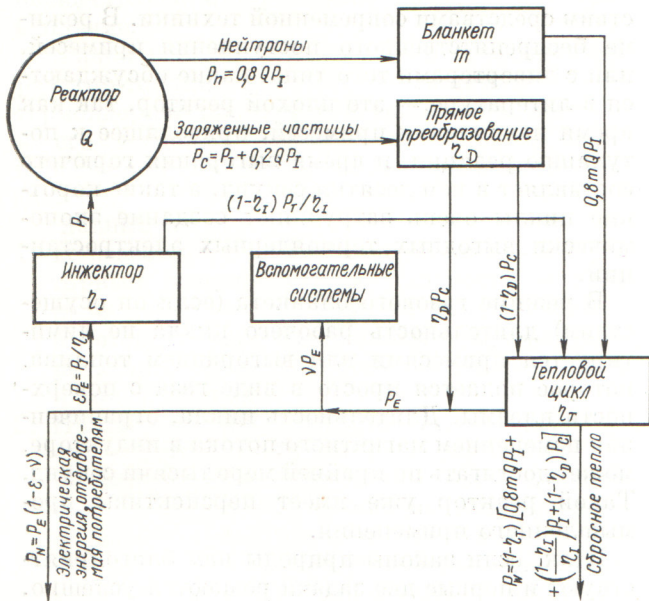


Рис. 1. Принципиальная схема термоядерной электростанции

Термоядерная реакция с выделением 17,6 МэВ на акт синтеза увеличивает мощность в  $Q$  раз, причем мощность  $0,8P_I Q$  уносят из плазмы нейтроны, и в blankets она умножается в  $m$  раз, а мощность  $P_I + 0,2P_I Q$  остается у заряженных частиц. Мощность  $0,8P_I Q m$  может быть превращена в электричество только в тепловом цикле с КПД  $\eta_T$  через парогенератор и турбину. Мощность заряженных частиц может быть в прямом преобразователе с КПД  $\eta_D$  частью превращена в электричество, а часть ее  $(1 - \eta_D)$  превращена в электричество в тепловом цикле с КПД  $\eta_T$ . Доля  $\varepsilon$  от электрической мощности расходуется на инжекцию, доля  $\nu$  на остальные собственные нужды электростанции.

Реактор с инжекцией работает как усилитель мощности. Усиление плазмы  $Q$  зависит от удержания плазмы магнитным полем. Формулы, по которым может быть рассчитано усиление  $Q$ , приведены в приложении.

Важнейшей характеристикой электростанции является ее полный КПД:

$$\eta_S = \frac{P_N}{P_N + P_W}, \quad (1)$$

где  $P_N$  — электрическая мощность, отдаваемая потребителям;  $P_W$  — сбросное тепло. Из рис. 1 следует, что

$$P_N = (1 - \varepsilon - \nu) \frac{P_I}{\eta_I} \{ \eta_T + \eta_D \eta_I (1 - \eta_T) +$$

$$+ Q \eta_I [0,2(\eta_T + \eta_D - \eta_D \eta_T) + 0,8m \eta_T] \}, \quad (2)$$

$$P_W = (1 - \eta_T) \{ 1 - \eta_D \eta_I + Q \eta_I [0,8m + 0,2(1 - \eta_D)] \} P_I / \eta_I,$$

а  $Q$  и  $\varepsilon$  связаны соотношением

$$\varepsilon^{-1} = \eta_I (\eta_D + \eta_T - \eta_T \eta_D) (1 + 0,2Q) + 0,8m Q \eta_T \eta_I + \eta_T (1 - \eta_I). \quad (3)$$

Если нет прямого преобразователя энергии заряженных частиц и все преобразование идет через тепловой цикл, то надо принять  $\eta_D = 0$ .

Если  $\varepsilon > 1 - \nu$ , то электростанция не выдает, а потребляет электроэнергию от сети, но за счет суммы потребляемой и вырабатываемой в своем реакторе энергии в blankets могут производиться такие ценные продукты, как тритий, плутоний, водород или другие химические вещества, синтезируемые в интенсивных потоках нейтронов.

Обсудим только производство плутония. Чистого термоядерного реактора  $m \approx 1,4$ .

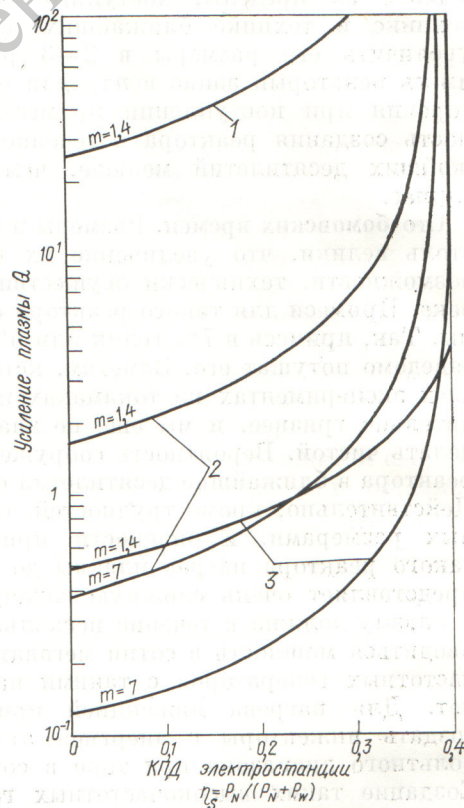


Рис. 2. Зависимость усиления плазмы  $Q$  от КПД термоядерной электростанции  $\eta_S$  для различных типов реакторов:

1, 2, 3 — лазерный, замкнутые и открытые реакторы ( $\eta_D = 0$ ; 0; 0,7 и  $\eta_I = 0,05$ ; 0,7; 0,88 соответственно); для всех систем  $\eta_T = 0,4$ ,  $\nu = 0,03$

При наличии в blankets  $^{238}\text{U}$  может быть достигнуто энерговыделение 100 МэВ на акт синтеза. При этом  $m \approx 7,0$  и наряду с увеличенным выделением тепла в blankets будет накапливаться  $^{239}\text{Pu}$ .

Некоторые примеры расчетов по формулам (1) — (3) приведены на рис. 2. Прежде чем обсуждать общие выводы из этих расчетов, рассмотрим примеры гибридных замкнутых и открытого реакторов.

### Примеры гибридных реакторов

**Гибридные реакторы-токамаки.** Предположим что вторая и третья задачи успешно решены, т. е. можно неограниченно долго сохранять необходимую чистоту плазмы и ток в плазме. Предположим также, что первая задача решается наихудшим образом, т. е. удержание дольше ста бомовских времен невозможно. Выводы о реакторе с зажиганием при этих условиях оказались неблагоприятными. Посмотрим, что меняет применение инжекции.

При рассмотрении реактора с зажиганием обескураживают размеры реактора. Зажиганию соответствует  $Q = \infty$ . Принимая конечные значения  $Q$ , необходимо для поддержания высокой температуры плазмы вводить в нее дополнительную мощность инжекцией. При этом мы связаны диапазоном параметров, указанных на рис. 2, если не хотим потреблять энергию от сети.

Ниже приведены параметры гибридного токамака-реактора с инжекцией. Формула экстраполяции эмпирическая или ста бомовских времен ( $\tau_E \propto aI$  и  $n\tau_E = 1 \cdot 10^{13}$  с/см<sup>3</sup>). Величина  $n\tau_E$  снижена неустойчивостями или примесями. Торможение инжектированного пучка кулоновское ( $n_T = 0,4$ ;  $n_I = 0,7$ ;  $\tau_c = 3\tau_E$ ).

Плотность плазмы $n$ , см <sup>-3</sup> . . . . .	3 · 10 <sup>13</sup>
Ток плазмы $I$ , МА . . . . .	2,9
Радиус плазмы $a$ , м . . . . .	1,3
Мощность реактора ( $E_R = 100$ МэВ), МВт . . . . .	270
Объем плазмы $V$ , м <sup>3</sup> . . . . .	177
Поток нейтронов $\Phi$ , см <sup>-2</sup> · с <sup>-1</sup> . . . . .	0,3 · 10 <sup>13</sup>
Тороидальность $A$ . . . . .	4
Температура плазмы $T$ , кэВ . . . . .	8,5
Давление плазмы $\beta_\Phi$ . . . . .	1
Ток инжекции дейтронов и тритонов $I_d, I_t, A$ . . . . .	300; 600
Энергия дейтронов и тритонов $E_d, E_t$ , кэВ . . . . .	150; 40
Усиление плазмы $Q$ . . . . .	0,6
Электрическая мощность инжекторов $P_I$ , МВт . . . . .	98
КПД электростанции $\eta_S$ . . . . .	0,12
Производство плутония $M$ , кг/год . . . . .	270
Электрическая мощность $P_N$ , отдаваемая в сеть, МВт . . . . .	32

Отсюда видно, как далеко можно снижать параметры реактора при наихудшем законе экстраполяции  $n\tau_E$ , все еще оставаясь в области положительных значений  $\eta_S$ . Если удержание лучше, то при тех же параметрах ток инжекции меньше, а  $n\tau_E, Q$  и соответствующая рис. 2 величина  $\eta_S$  больше. Более благоприятное удержание и увеличение размеров реактора приближают  $\eta_S$  к  $\eta_T$ , но у гибридного реактора с инжекцией всегда  $\eta_S < \eta_T$ .

**Гибридные открытые реакторы.** Для открытых реакторов не существует второй и третьей задач. Однако возможные решения первой задачи ограничивают область их применения. В замкнутых реакторах при достаточно больших размерах и напряженности магнитного поля реактора возможно в принципе зажигание ( $Q = \infty$ ). Для открытых реакторов  $Q$  не зависит ни от размеров, ни от напряженности магнитного поля, и максимальное усиление плазмы, соответствующее  $E_{Tя} = 17,6$  МэВ, составляет  $1,44 \lg_{10} R$  [4] и достигается при энергии инжекции около 200 кэВ. Пробочное отношение с учетом диамагнетизма плазмы при современных ниобий-титановых сверхпроводниках, по-видимому, не удастся поднять выше  $R = 4$ , а в будущем едва ли окажется осуществимым  $R > 8$ , так как мы всегда будем ограничены прочностью материалов при попытках поднять поле в пробках больших размеров выше 100 кэВ. Таким образом, принципиальный предел усиления плазмы открытых DT-реакторов составляет  $Q_{\text{макс}} \sim 1,0$ .

КПД электростанции с гибридным реактором согласно рис. 2 при этом получается близким к  $\eta_T$ , и потому такое решение было бы вполне приемлемым в большом масштабе для мировой энергетической системы. В то же время электростанция с чистым открытым реактором будет иметь КПД не более 0,23 и не сможет конкурировать с атомными электростанциями.

Однако очень мала вероятность того, что максимальное значение  $Q = 1,0$  будет достигнуто. По-видимому, реально достижимые значения  $Q$  будут в несколько раз меньше. Для получения полезной энергии от чистого реактора это потребовало бы повышения КПД инжекции  $\eta_I$  и прямого преобразования  $\eta_D$  выше значений, указанных на рис. 2. Вероятность успеха в этом отношении в ближайшие десятилетия мала. Но гибридный реактор мог бы служить для производства плутония без потребления электроэнергии извне вплоть до  $Q = 0,12$ . Сейчас невозможно оценить вероятность этого события, как нельзя оценить вероятность того

или иного закона экстраполяции  $nT_E$  для токамаков. Несомненно лишь общая тенденция в обоих случаях. Малые  $Q$  более вероятны.

В табл. 2 приведены примеры возможных открытых гибридных реакторов, для которых  $\eta_S = 0$  и вся электроэнергия расходуется на инжекцию. Объем плазмы взят произвольно без проработки конструкции обмотки. Едва ли возможно совместить при толщине blankets с защитой в 1,5 м указанное пробочное отношение с меньшим объемом плазмы.

### Место гибридных реакторов в энергетической системе мира

Термоядерные реакторы любого типа приобретут промышленное значение только в так называемую отдаленную фазу энергетической проблемы [5], начинающуюся в 90-х годах, когда быстрые реакторы деления уже будут широко распространены. Несмотря на это, производство дополнительного плутония на гибридных термоядерных реакторах еще может быть полезным.

**Гибридные реакторы с зажиганием.** Сравним быстрый реактор-размножитель и термоядерный реактор с зажиганием, в blankets которого плутоний образуется из  $^{238}\text{U}$ . Тепловые КПД обоих реакторов одинаковы и с точки зрения теплового воздействия на среду равноценны. В первом коэффициент воспроизводства плутония равен 1,5, и, следовательно, на каждый мегаватт его тепловой мощности вырабатывается 200 г плутония в год. В гибридном термоядерном реакторе можно будет получать плутония до 1 кг/год на каждый мегаватт тепловой мощности [3]. Если цена плутония будет 20 долл/г и электростанция будет окупаться за 8 лет, то только продажа плутония позволит при КПД  $\eta_T = 40\%$  производить капитальные затраты по сооружению электростанции в 400 долл/кВт установленной электрической мощности. Добавив продажу электроэнергии по 0,5 цент/кВт·ч, получаем дополнительно допустимые капитальные затраты в 360 долл/кВт. Таким образом, гибридная электростанция с КПД  $\eta_S = 40\%$  будет окупаться за 8 лет при капитальных затратах до 760 долл/кВт. Согласно сделанным оценкам капитальные затраты на термоядерные реакторы-токамаки будут значительно ниже. Добавление плутония в blankets реактора с зажиганием выгодно еще потому, что при заданных размерах и мощности реактора снижается нагрузка первой стенки и уменьшается ее радиационное повреждение.

Открытый гибридный реактор с  $E_{\text{я}} = 100$  МэВ/акт синтеза (максимальное плазменное усиление  $Q = 1,14 \lg_{10} R$ ; поле в центре ловушки 25 кЭ)

Таблица 2

Давление плазмы $\beta$	0,72			
Энергия инжекции $E_{\text{и}}$ , кэВ	200			
Плотность плазмы $n$ , см <sup>-3</sup>	$4 \cdot 10^{13}$			
Объем плазмы $V$ , м <sup>3</sup>	100			
КПД прямого преобразования $\eta_D$	0,7			
КПД теплового цикла $\eta_T$	0,4			
Вакуумное пробочное отношение $R_0$	2	4		
Плазменное пробочное отношение $R$	3,8	7,5		
Плазменное усиление $Q$	0,67	1,0		
Кулоновское удержание $n\tau$ , с/см <sup>3</sup>	$4,3 \cdot 10^{13}$	$6,5 \cdot 10^{13}$		
КПД инжекции $\eta_I$	0,88	0,70	0,88	0,70
Плазменное усиление $Q_{\text{дост}}$ , достаточное для расширенного воспроизводства при $\eta_S = 0$	0,12	0,20	0,12	0,20
Удержание может быть меньше кулоновского в указанное число раз	5,5	3,3	8,3	5,0
Допустимое удержание $n\tau$ , $10^{13}$ с/см <sup>3</sup>	0,78	1,3	0,78	1,3
Ток инжекции $I_{\text{и}}$ , А	3300	2000	3300	2000
Тепловая мощность $P_T$ , МВт	460			
Поток нейтронов на первую стенку $\Phi$ , см <sup>-2</sup> ·с <sup>-1</sup>	$2 \cdot 10^{13}$			
Электроэнергия $P_N$ , отпущаемая потребителям	0			
Производство плутония $M$ , кг/год	460			

Таким образом, термоядерные гибридные реакторы с зажиганием позволят после 2000 года строить меньше дорогих реакторов-размножителей и больше относительно дешевых тепловых реакторов деления. Сами термоядерные гибридные реакторы, наверное, будут дороже быстрых реакторов-размножителей равной мощности, но, как показывает приведенная оценка, они могут быть экономически выгодными, производя примерно в пять раз больше плутония на единицу тепловой мощности, чем быстрые реакторы-размножители.

**Гибридные реакторы с инжекцией.** Гибридные реакторы с инжекцией могут быть использованы или только для производства плутония

( $\eta_S = 0$ ), или для одновременного производства плутония и электроэнергии.

Рассмотрим несколько вариантов перспективы их применения.

А. Экстраполяция  $\eta_E$  к реакторным параметрам в токамаках или стеллараторах благоприятная, и реактор с зажиганием получается технически выполнимым и экономически оправданным. Применение инжекции все-таки может оказаться выгодным, если реакторы с зажиганием будут иметь минимальные мощности в несколько тысяч мегаватт. При этом в замкнутом реакторе доступность сильно радиоактивных частей, могущих выходить из строя, существенно ограничена. Это приводит к значительной вероятности нежелательных перерывов в использовании больших мощностей. Реакторы с инжекцией можно делать с меньшей мощностью, и потому их остановки на ремонт будут меньше мешать энергоснабжению. Гибридность, т. е. производство плутония, в этом случае имеет благоприятное влияние на конструкцию термоядерного реактора. Это позволит, например, обходиться менее совершенными инжекторами для сохранения того же выходного КПД —  $\eta_S$ . Гибридные реакторы с инжекцией могут быть в этом случае полезны для замены части дорогих быстрых реакторов-размножителей, как и обсужденные гибридные реакторы с зажиганием.

Б. Реакторы с зажиганием не удастся создать, но замкнутый реактор (токамак или стелларатор) с инжекцией или открытый реактор осуществимы. Для замкнутого реактора с инжекцией усиление  $Q$  тем больше, чем ближе  $\eta_E$  к  $1,5 \cdot 10^{14}$  с/см<sup>2</sup>. Поэтому как чистые, так и гибридные замкнутые реакторы с инжекцией могут получить промышленное применение. Вероятность применения гибридных реакторов больше, так как они могут быть дороже, оставаясь экономически выгодными. Для открытых реакторов дело обстоит иначе. Если считать  $Q = 1$  верхним пределом для открытых реакторов, то чистые открытые реакторы не представляют интереса для промышленного производства электроэнергии. Для этого значения  $Q$  согласно рис. 2  $\eta_S = 0,22$ . При тех же значениях  $Q$  КПД гибридной электростанции с открытым реактором может быть равен 0,35.

Экономическая целесообразность создания гибридных реакторов обсуждена выше. Однако все гибридные электростанции с инжекцией имеют  $\eta_S < \eta_T$ . Спрашивается: будет ли приемлемо засорение среды обитания, если большую часть электроэнергии и плутония

производить на таких гибридных реакторах?

Для оценки возникающей ситуации рассмотрим следующий предельный случай: вся энергетическая система мира построена только на тепловых реакторах деления и на гибридных реакторах синтеза с инжекцией, производящих недостающий плутоний и электроэнергию с КПД  $\eta_S$ . Пусть мощность энергетической системы мира постоянна во времени. В этом случае КПД всей мировой энергетической системы будет выражаться формулой

$$\eta_{MS} = \frac{\eta_T + 0,4\eta_S}{1,4}$$

при выводе которой принято, что в гибридных реакторах производится плутоний в количестве 1 кг/год МВт (т). Таким образом, КПД гибридной электростанции может быть в пределах  $0 \leq \eta_S < \eta_T$ . Легко убедиться, что если  $\eta_T = 0,4$ ;  $\eta_S = 0,3$ , то  $\eta_{MS} = 0,37$ .

По-видимому, такое незначительное снижение суммарного КПД энергетической системы мира не может быть сильным доводом против использования гибридных реакторов с инжекцией, и их судьбу решит не вопрос о тепловых сбросах, а экономические и технические аргументы.

### Заключение

Область применения гибридных реакторов в энергетике зависит от еще не изученных на опыте законов физики плазмы с реакторными параметрами. Если удержание плазмы близко к эмпирическому закону или лучше, то производство плутония в blankets реактора синтеза с зажиганием оправдывает капитальные затраты на сооружение электростанции вплоть до 700 долл/кВт.

Если зажигание реакции технически или экономически невыгодно, замкнутые реакторы с инжекцией могут служить для промышленного производства электроэнергии и быть как чистыми, так и в виде гибридов, открытые реакторы — только в виде гибридов. На современном уровне знаний наименьшее число нерешенных задач при создании гибридных реакторов осталось для открытых магнитных ловушек (вопрос об удержании). На втором месте стоят стеллараторы (добавляется вопрос о примесях) и на третьем — токамаки (должен быть решен еще вопрос о стационарном поддержании тока в плазме).

Заметим, что удержание в сто бомовских времен, принятое как наилучшее для токамаков

и стеллараторов, еще не достигнуто ни в одном эксперименте. Поэтому всякие прогнозы о возможности более хорошего удержания в реакторных режимах пока не имеют никакого экспериментального обоснования. Ближайшее пятилетие должно внести ясность в этот важнейший вопрос.

### Приложение

#### Метод вычисления параметров реакторов с инжекцией

**Реактор-токамак.** Принято, что стационарное состояние поддерживается с концентрациями дейтронов  $n_d$  и тритонов  $n_t$ , причем  $\gamma = \frac{n_t}{n_d} = 2$ . Предполагается, что время жизни частиц  $\tau_c$  втрое больше энергетического  $\tau_E$ . Из условий баланса давлений

$$\left(\frac{I}{a}\right)^2 = 2,0 \cdot 10^{-9} n T / \beta \Phi,$$

выражений  $n\tau_E$ , приведенных в тексте, и формул

$$T = \frac{E_d + \gamma E_t}{3(\gamma + 1) \frac{\tau_c}{\tau_E}} = \frac{E_d + 2E_t}{27}; \quad q = \frac{5aI}{AI};$$

$$I_d = \frac{nV}{3\tau_c}; \quad I_t = \gamma I_d = 2I_d$$

вычисляются значения  $I$ ,  $a$ ,  $E_d$ ,  $I_d$ ,  $\tau_E$ ,  $\tau_c$  при заданных  $T$ ,  $n$ ,  $E_t$ ,  $A$ ,  $\beta$ ,  $n\tau_E$ ,  $q$ .

По формуле из работы [3]

$$Q = \frac{\gamma}{1 + \gamma} (f_0 + n\tau_c \langle \sigma v \rangle) \frac{E_{TЯ}}{E_d + \gamma E_t}$$

вычисляется величина  $Q$ . Здесь  $f_0$  — вероятность DT-реакции за время торможения дейтронов с энергией  $E_d$  в тритиевой плазме с температурой электронов  $T$ ,  $\langle \sigma v \rangle$  — скорость DT-реакции в максвелловской плазме с температурой ионов  $T$ .

Наконец, тепловая мощность реактора вычисляется по формуле

$$P_T = Q \frac{E_{Я}}{E_{TЯ}} (I_d E_d + I_t E_t),$$

где  $E_{Я}$  — мощность, выделяющаяся в реакторе, на акт синтеза, включая бланкет;  $E_{TЯ} = 17,6$  МэВ.

#### Открытый реактор. Усиление плазмы

$$Q = \frac{1}{4} n\tau \langle \sigma v \rangle \frac{E_{TЯ}}{E_{и}},$$

где согласно [4],

$$n\tau = 2,67 \cdot 10^{10} E_{и}^{3/2} \lg_{10} R.$$

Пробочное отношение в присутствии плазмы  $R = R_0 / \sqrt{1 - \beta}$ , где  $R_0$  — вакуумное пробочное отношение. Согласно [4],  $Q$  достигает положения максимума в окрестности  $E_{и} = 200$  кэВ. Для  $E_{Я} = 17,6$  МэВ максимальное усиление  $Q = 1,14 \lg_{10} R$ . С помощью современных ниобий-титановых сверхпроводников легко сделать  $R_0 = 2$  ( $H_m = 50$  кЭ,  $H_0 = 25$  кЭ.) Через 5–10 лет можно будет, по-видимому, сделать  $R_0 = 4$  ( $H_m = 400$  кЭ,  $H_0 = 25$  кЭ).

При расчете плотности плазмы по  $\beta$  и  $H_0$  принимаем, что давление плазмы  $p = 1,4nE_{и}$ .

Ток инжекции вычисляем по формуле  $I_{и} = n^2 V / n\tau$ , причем объем плазмы произвольно принят равным  $100 \text{ м}^3$ . Тепловая мощность реактора  $P_T = Q \frac{E_{Я}}{E_{TЯ}} E_{и} I_{и}$ .

Согласно [3] при наличии  $^{238}\text{U}$  в бланкете  $E_{Я}$  может быть равным 100 МэВ.

Поступила в Редакцию 16/V 1975 г.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Dawson I., Furth H., Tenney F. «Phys. Rev. Letters», 1971, v. 26, p. 1156.
2. Пистунович В. И. «Атомная энергия», 1973, т. 35, вып. 1, с. 11.
3. Головин И. Н., Пистунович В. И., Шаталов Г. Е. Доклад на Рабочей группе по проблемам конструирования реакторов синтеза. Калем, 29 янв. — 15 февр. 1974 г.
4. Futch A. e. a. «Plasma Physics», 1972, v. 14, p. 211.
5. Хэйфеле В. Бюл. МАГАТЭ, 1974, т. 16, № 1/2, p. 3.