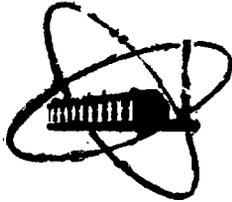




SUB 201628

ФЭИ-1192



ФИЗИКО-ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ

В. Г. ИЛЮНИН, В. М. МУРОГОВ, В. Я. РУДНЕВА,  
А. Н. ШМЕЛЕВ

**Анализ потенциальных возможностей  
бридеров различного типа  
в многокомпонентной модели  
ядерной энергетики**

Обнинск — 1981

УДК 621.039.51

**В. Г. Илюнин, В. М. Муратов, В. Я. Руднева, А. Н. Шмелев.**  
Анализ потенциальных возможностей бридгов различного типа в многокомпонентной модели ядерной энергетики.  
ФЭИ-1192. Обнинск: ФЭИ, 1981. — 19 с.

В данной работе проведен расчетный анализ показателей различных вариантов многокомпонентной модели ядерной энергетики (ЯЭ) с использованием различных типов альтернативных бридгов. Под альтернативными бридгами понимаются самые разнообразные производители вторичного ядерного горючего, как-то:

- различные варианты быстрых реакторов (БР) с усовершенствованными видами топлива (например, с металлическим топливом);
- гибридные термоядерные реакторы (ГТЯР);
- электроядерные установки (ЭЯ), находящиеся в настоящее время на различных стадиях научных исследований и разработок.



## 1. ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время наряду с исследованиями, разработкой и строительством ядерных реакторов (ЯР) на быстрых нейтронах, в первую очередь жидкометаллических типа БН-350, БН-600, БН-1600, "Super Phenix" и др. [1], в литературе [2,3,4] обсуждается предположение о возможности и целесообразности использования в ядерной энергетике (ЯЭ) будущего альтернативных бридеров-наработчиков вторичного ядерного горючего, в том числе гибридных термо-ядерных реакторов (ТЯР) и электроядерных установок (ЭЯ). Разматриваются различные конструкции и режимы работы ТЯР и ЭЯ [2,3,4] - с отрицательным или нулевым энергетическим балансом и выдачей только вторичного ядерного горючего (относительно более простые и дешевые установки);

- двухцелевые установки с выдачей электроэнергии и вторичного горючего (относительно более сложные и дорогие).

При этом ожидается [2], что введение таких наработчиков позволит снизить до минимума долю дорогостоящих по сравнению с тепловыми реакторами бридеров, тем самым улучшить структуру системы производителей ядерной энергии, и привести её в соответствие со структурой потребителей. Это может привести к улучшению экономических показателей ЯЭ в целом.

В настоящей работе проведено расчётное сравнение показателей модели ЯЭ с использованием различных типов альтернативных бридеров.\*

В основу рассмотрения положена методика системного анализа роли и показателей бридеров, изложенная в работе [5]. Указанная методика была распространена на случай многокомпонентной модели ЯЭ, развивающейся с внешним источником ядерного горючего (добыча природного урана или наработка вторичного ядерного горючего в специально предназначенных для этого установках типа ЭЯ или ТЯР).

---

\*) Рассмотрение проведено без учёта влияния особенностей различных типов бридеров.

## II. МЕТОДИКА АНАЛИЗА ПОКАЗАТЕЛЕЙ МОДЕЛИ ЯЭ

Предполагается, что ядерно-энергетическая система, состоящая из реакторов на быстрых (БР) и тепловых (ТР) нейтронах, находится в установившемся периоде развития. При этом в систему возможно дополнительное поступление топлива. Данную систему для одноцелевой модели ЯЭ (т.е. при использовании ЯР, например, только для выработки электроэнергии) в режиме самообеспечения горючим описать двумя уравнениями:<sup>\*</sup>

Уравнение топливного баланса:

$$g_s \frac{dN_s}{dt} + g_r \frac{dN_r}{dt} = G_0(t) + z_s N_s(t) - z_r N_r(t) \quad (1)$$

Уравнение роста выработки электроэнергии:

$$z_s \frac{dN_s}{dt} + z_r \frac{dN_r}{dt} = \epsilon \frac{dW_3}{dt} \quad (2)$$

где

индексы "s" и "r" относятся к быстрому и тепловому реакторам соответственно;

- $g_s, g_r \left[ \frac{\text{кг-цикл}}{\text{МВт(т)}} \right]$  - удельная загрузка в топливном цикле быстрого и теплового реактора, соответственно;
- $z_s \left[ \frac{\text{кг}}{\text{МВт(т)год}} \right]$  - удельное ежегодное производство избыточного горючего в быстром реакторе с учётом потерь в топливном цикле;
- $z_r \left[ \frac{\text{кг}}{\text{МВт(т)год}} \right]$  - удельное ежегодное потребление горючего в тепловом реакторе с учётом потерь в топливном цикле;
- $N(t) [\text{МВт-т}]$  - тепловая мощность ЯР;
- $G_0(t) [\text{кг/год}]$  - дополнительные ежегодные поступления ядерного горючего в систему;
- $\epsilon$  - коэффициент полезного действия АЭС (нетто);

\*) Одноцелевая модель ЯЭ выбрана из стремления к простоте изложения. Учёт разнообразия возможных потребителей ЯЭ, а так же их работы существенно усложняет изложение, но не меняет, в принципе, основных выводов.

$\xi$  - доля электроэнергии, вырабатываемой на АЭС с ЯР, т.е.  $(1-\xi)$  - доля мощностей ЯЭ, приходящая на альтернативные бридлеры;

$W_0$  [МВт-эл] - электрическая мощность всей системы ЯЭ.

Учитывая экспоненциальный характер развития системы ЯЭ, уравнения (1)-(2) нетрудно привести к следующему виду:

$$\begin{cases} N_B R_B + G_0 = N_T R_T \\ \eta_B N_B + \eta_T N_T = \xi W_0 \end{cases} \quad (3)$$

Здесь, как это было введено в работе [5], через  $R_B = Z_B - \omega g_B$  обозначено избыточное производство горючего в системе быстрых реакторов для подпитки тепловых реакторов (ТР) с учётом развития ЯЭ в расчёте на 1 МВт-т в год, вырабатываемый в ТР. Соответствующее полное потребление ядерного горючего тепловыми реакторами с учётом темпов развития ЯЭ обозначено через  $R_T = Z_T + \omega g_T$  в расчёте на 1 МВт-т в год, вырабатываемый в ТР. Для оценки эффективности различных вариантов рассматриваемой модели ЯЭ введем функционал  $F(N_B, N_T, G_0, C_B, C_T, C_u)$ , характеризующий стоимость электроэнергии, производимой в системе ЯЭ:

$$F = \frac{C_B \cdot N_B + C_T \cdot N_T + C_u \cdot G_0}{W_0} \quad (4)$$

Здесь:

$C_B, C_T$  [руб/МВт(т).год] - ежегодные суммарные затраты при производстве электроэнергии на АЭС в расчёте на единицу тепловой мощности для быстрых и тепловых реакторов, соответственно;

$C_u$  [руб/кг] - суммарные затраты на производство единицы топлива в источнике  $G_0$ .

В эти суммарные затраты включены расходы на капитальное строительство и эксплуатацию дополнительного источника ядерного горючего, на переработку, изготовление ядерного топлива, его хранение, транспорт и т.п. Введенный функционал  $F$  зависит от соотношения мощностей БР и ТР, от дополнительного вклада источника горючего - от удельных экономических показателей каждого типа установок. Запишем указанный функционал (4), решив систему уравнений (3) относительно  $N_B$  и  $N_T$  и выразив стоимостные показатели БР и ТР в относительных единицах:

$$F = C_T \left\{ \frac{C_S (R_T \cdot \varepsilon) + R_S \cdot \varepsilon}{M} + G \left( \frac{C_U}{C_T} + \frac{\eta_S}{M} - \frac{C_S}{C_T} \frac{\eta_T}{M} \right) \right\} \quad (5)$$

где

$$M = R_S \cdot \eta_T + R_T \cdot \eta_S, \quad G = \frac{C_0}{W_0}$$

Использование выражения (5) для сравнительного анализа различных вариантов многокомпонентной модели ЯЭ, развивающейся с использованием бридеров различного типа и реакторов на тепловых нейтронах, позволяет:

- исключить из рассмотрения вопрос о "цене" промежуточного продукта - вторичного ядерного горючего;
- ограничиться использованием относительных соотношений суммарных затрат установок различного типа  $\frac{C_U}{C_T}$ ;  $\frac{C_U}{C_T}$ ;  $\frac{C_U}{C_S}$ , что облегчает анализ показателей различных вариантов ЯЭ.

Необходимо отметить, что суммарные затраты, относимые к источнику ядерного горючего,  $C_U$ , будут ниже использованы в двух формах записи:

- а) в случае специализированного наработчика\* суммарные затраты отнесены на 1 МВт тепловой энергии, вырабатываемой за год в системе ЯЭ за счёт ядерного горючего, поставляемого этим наработчиком:

$$C_U^a \text{ [руб/МВт-т.год]} = C_U \text{ [руб/кг]} \cdot 0,365 \text{ [кг/МВт-т.год]}$$

Здесь: 0,365 [кг/МВт-т.год] - энергетический эквивалент 1 кг ядерного горючего;

- б) в случае двухцелевого бридера типа ГТЯР или ЭЯ-установки\*\* суммарные затраты, как это принято при сравнении эффективности таких установок [2], отнесены на 1 МВт тепловой энергии, вырабатываемой за год данной установкой для системы ЯЭ:

$$C_U^b \text{ [руб/МВт-т в год]} = C_U \text{ [руб/кг]} \frac{G \text{ [кг/год.МВт-эл.]}}{(1-\delta)} \quad ?$$

\* Под специализированным наработчиком понимается бридер, производящий вторичное ядерное горючее без выдачи полезной энергии.

\*\* В этом случае предполагается, что ГТЯР и ЭЯ-установка наряду с производством вторичного ядерного горючего выдают полезную энергию для системы ЯЭ.

### III. РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ

Были рассмотрены три основных варианта многокомпонентной модели развивающейся ЯЭ с реакторами различного типа:

- а) без подпитки системы ЯЭ от внешнего источника;
- б) с подпиткой системы ЯЭ горючим от специализированного наработчика, не выдающего в систему электроэнергию ( $\xi = 1$ );
- в) с подпиткой системы ЯЭ ядерным горючим от наработчика (бридера), который выдает в систему также электроэнергию ( $\xi < 1$ ).

Расчётные исследования были выполнены при использовании в качестве ТР водо-водяного реактора типа ВВЭР-1000. В качестве БР рассматривались 3 типа быстрых реакторов с жидкометаллическим охлаждением:

- на оксидном  $PuO_2 - UO_2$  топливе (типа БН-1600),
- на металлическом топливе,
- с совместным использованием оксидного и металлического топлива в одном реакторе [5].

Основные системные показатели рассматриваемых типов реакторов приведены в таблице I. Показатели альтернативных бридеров, ЭЯ и ГТЯР, по темпу наработки ядерного горючего и по доле производимой ими электрической энергии, а так же соотношение суммарных затрат для различных типов установок, варьировались в широких пределах.

Таблица I  
Основные системные показатели рассматриваемых типов реакторов

Показатели \ Реактор	БР [5]			ТР	ЭЯ	ГТЯР
	оксидный	окись-металл	металлическ.	ВВЭР	[3]	[2]
$q \left[ \frac{кг-цикл}{МВт(т)} \right]$	1,2	1,2	1,0	0,9	-	-
$z \left[ \frac{кг-цикл}{МВт(т) \cdot год} \right]$	0,16	0,24	0,32	0,12	0,4	0,8
$z \%$	40	40	35	30	40	30

Результаты сравнения эффективности различных вариантов в построения многокомпонентной модели ЯЭ по критерию  $F$  приведены на рис. 1 + 5.

в замкнутой двухкомпонентной модели ЯЭ (Рис. 1) в случае равных суммарных затрат в быстрых и тепловых реакторах на единицу электрической энергии (т.е. с учётом разницы  $\eta_E$  и  $\eta_T$  для соотношения суммарных затрат на единицу тепловой мощности  $C_E/C_T = 1,33$ ) изменение параметров воспроизводства БР (переход с оксидного на металлическое топливо) не влияет на суммарные затраты на развитие ЯЭ в целом, а значит и на стоимость электроэнергии в ЯЭ, поскольку в этом случае в рассматриваемой модели изменение структуры ЯЭ не связано с изменением функционала затрат на производство электроэнергии. При равных или близких значениях суммарных затрат  $C_E$  и  $C_T$  наиболее существенной, с точки зрения снижения стоимости электроэнергии, является возможность повышения эффективности использования капиталозложений и топлива в БР [5], т.е. возможность достижения в БР значений  $\eta_E$ , характерных для реакторов типа БН-600:

$\eta_E \approx 40\% > \eta_T \approx 30\%$ . С ростом соотношения суммарных затрат,  $C_E/C_T > 1,33$ , возрастает роль факторов воспроизводства, т.е. растёт эффект от замены в БР оксидного топлива на металлическое. При этом для довольно реалистичных значений  $1,33 < C_E/C_T < 2,0$  аналогичный эффект обеспечивается частичной заменой оксидного топлива на металлическое без изменения температурного режима работы реактора и при сохранении его энергетических показателей в рамках концепции БР с совместным использованием оксидного и металлического топлив [6]\*). Для иллюстрации тенденции влияния усовершенствования различных показателей БР на Рис. 1 приведен также вариант с соотношением затрат для, по-видимому, нереалистичного случая  $C_E/C_T = 50$ .

### III-1. Альтернативные бридеры - специализированные наработчики горячего

Структура ЯЭ будущего (соотношение мощностей ЯР различного типа) и её соответствие структуре потенциальных потребителей энергии (например, по уровню температур потребителей тепла) могут стать одним из критериев, определяющих оптимальность той или иной модели ЯЭ [2]. В модели ЯЭ, развивающейся с использованием БР типа БН, требуемая доля БН с оксидным топливом составляет ~ 50 + 80% в

\* В дальнейшем, говоря о БР с металлическим топливом, мы будем иметь в виду и БР с совместным использованием металлического и оксидного топлив.

зависимости от темпа развития ЯЭ ( $\omega = 0,0 + 0,10$ ). При дополнительных поступлениях в систему ЯЭ ядерного горючего от специализированного наработчика требуемая доля относительно коротких БР может быть существенно снижена. Изменение доли мощности, вырабатываемой быстрыми реакторами, в зависимости от относительной производительности наработчика для различных темпов развития ЯЭ, показано на рис. 2. В качестве характеристики производительности наработчика на рис. 2 используется величина относительной доли ядерного горючего, вырабатываемого в системе ЯЭ специализированными наработчиками,  $G'$  :

$$G' = \frac{G}{G + R_g'} \quad (6)$$

Здесь:  $R_g' = R_g \cdot \frac{N_g}{W_g}$  - количество избыточного ядерного горючего, поступающего из БР в расчёте на 1 МВт-эл, вырабатываемой системой ЯЭ в год. Возможная структура многокомпонентной ЯЭ для различных темпов её развития в зависимости от изменения типа наработчика (ГТР или ЭЯ) и доля его вклада в выработку электроэнергии системой ЯЭ, приведена в таблице 2.

Таблица 2

Изменение структуры модели ЯЭ, содержащей ТР, БР в зависимости от производительности специализированного наработчика ядерного горючего.

Вариант	1	2	3
Производительность специализированного наработчика ядерного горючего [кг/год.МВт-эл. системы ЯЭ.]	0,0	0,2	0,4
Доля электроэнергии, вырабатываемой АЭС с БР типа БН-1600 [%]	68,8	56,3	18,6
Доля электроэнергии, вырабатываемой АЭС с ТР типа ВВЭР-1000 [%]	31,2	43,7	81,2

Как видно из таблицы 2 и рис. 2, в широком диапазоне изменения темпов развития ЯЭ,  $0 \leq \omega \leq 0,10$ , введение в структуру ЯЭ альтернативных брндеров-специализированных наработчиков ядерного

горючего - позволяет снизить необходимую долю БР в ЯЭ в несколько раз (до ~ 10 + 30%) и увеличить относительную долю ТР - ЯР с наименьшими суммарными затратами (в основу рассмотрения, как уже говорилось, положено условие  $\frac{C_T}{C_B} \leq 1$ ) до 60% и более. Однако при этом, как показали результаты расчётов (см. рис. 3), введение специализированного наработчика, не вырабатывающего энергию для системы ЯЭ, приводит к росту суммарных затрат на 1 МВт-эл энергии, вырабатываемой в системе. Для того, чтобы стоимость электроэнергии в трёхкомпонентной модели ЯЭ с использованием специализированного наработчика (типа ЗЯ и ГТЯР) не превышала её значения в двухкомпонентной модели БР + ТР, эквивалентные суммарные затраты для наработчика, как видно из рис. 3, не должны превышать суммарных затрат БР и ТР в соотношении:

$$\frac{C_{\text{н}}^{\text{а}}}{C_B} < 0,4 \quad \text{при} \quad \frac{C_T}{C_B} = 2, \quad \text{т.е.} \quad \frac{C_{\text{н}}^{\text{а}}}{C_T} < 0,8, \quad \text{что}$$

по-видимому, нереально. То есть, стремление к обеспечению оптимальной структуры ЯЭ и минимизации затрат на её развитие вступают в этом случае в противоречие.

### III-2. Альтернативные бридеры - двухцелевые установки

Проведенные исследования показали, что выход из указанного положения следует искать в двух направлениях. Во-первых, усовершенствование показателей воспроизводства БР за счёт использования более совершенных видов топлива, например, металлического. При этом системный критерий совершенства быстрого реактора, например, типа БН-1600, по воспроизводству -  $R_B$ , может быть улучшен в зависимости от темпов развития ЯЭ в несколько раз (см. таблицу 3).

Таблица 3

Изменение показателя воспроизводства быстрого реактора и доли быстрых реакторов с оксидным и металлическим топливом в ЯЭ в зависимости от темпов развития ЯЭ [5]

Показатели $w$	$R_B$		$\frac{BR_B}{R_B}^*$	$\frac{N_B}{(N_B + N_T)}$	
	БР-окись	БР-металл		БР-окись ТР-ВВЭР	БР-металл ТР-ВВЭР
0,01	0,15	0,31	1,1	0,46	0,36
0,02	0,14	0,30	1,2	0,50	0,39
0,05	0,10	0,27	1,7	0,68	0,48
0,10	0,04	0,22	4,5	0,84	0,64

\* При переходе с оксидного топлива на металлическое.

В результате доля ТР в двухкомпонентной модели ЯЭ (БР + ТР) может быть увеличена до значений, получаемых при использовании в ЯЭ специализированного наработчика, т.е. до  $\geq 60\%$ . А функционал  $F$ , характеризующий стоимость электроэнергии в системе ЯЭ, будет иметь для такой структуры наименьшее значение из всех рассматриваемых вариантов (см. рис. 1 и 3).

Во-вторых, исследования показали, что условия конкурентоспособности для рассматриваемых альтернативных бридеров - наработчиков вторичного ядерного горючего - существенно улучшаются, если наряду с горючим они будут производить электроэнергию и/или технологическое тепло (в рамках многоцелевой модели ЯЭ). То есть, предпочтение следует отдать двухцелевому наработчику ядерного горючего, выходящему в систему ЯЭ наряду с горючим так же и энергией<sup>\*</sup>. В этом случае, допустимые суммарные затраты,  $C_{\Sigma}^{\delta}$  для наработчика, отнесенные на единицу вырабатываемой им энергии (МВт-г.год) могут превышать соответствующие суммарные затраты БР (см. рис. 4). Структура производителей электроэнергии для такой многокомпонентной модели ЯЭ, содержащей ТР, БР и альтернативные бридеры типа ГТЯР и ЭЯ-установок, приведена в таблице 4.

Таблица 4

Структура производителей электроэнергии для многокомпонентной модели ЯЭ ( $\omega = 0,05$ ), содержащей наряду с тепловыми и быстрыми реакторами, альтернативные бридеры, типа ГТЯР и ЭЯ-установок

Модель ЯЭ	БР+ТР		БР + ТР + ЭЯ		БР + ТР + ГТЯР	
	1	2	3	4	5	
Доля электроэнергии, вырабатываемой альтернативными бридерами:						
ГТЯР [%]	0	0	0	10	15	
ЭЯ [%]	0	20	30	0	0	
Производительность альтернативного бридера [кг-гор/год. МВт-эл сист.]	0	0,20	0,30	0,20	0,100	
Доля электроэнергии, вырабатываемой АЭС с БР типа БН-1600 [%]	68,8	30	10,6	28,1	21,8	
Доля электроэнергии, вырабатываемой АЭС с ТР типа ВВЭР-1000 [%]	31,2	50	79,4	61,9	78,2	

\* Впервые этот факт был отмечен профессором И.В. Сухомининым.

Полученные оценки позволяют определять стоимостные области возможной конкурентоспособности для электроядерных установок и для гибридных термоядерных реакторов (см. Рис. 5). Показатели ГТЯР взяты из работы [2]. Показатели ЭЯ-установки взяты из работы [8] с допущением о возможности повышения мощности blankets ЭЯ и выдачи избыточной электроэнергии в систему ЯЭ. Повышение мощности blankets может быть достигнуто путем повышения среднего содержания накапливаемого ядерного горючего в топливе blankets ЭЯ или введением в него замедлителя.

Несмотря на то, что большинство опубликованных данных относится к проектам ЭЯ-установок с нулевым или отрицательным собственным энергетическим балансом (без учёта наработки плутония), указанное допущение подтверждается последними результатами разработки ЭЯ-установки, в которой наряду с горючим вырабатывается существенное количество электроэнергии - втрое превышающее затраты на собственные нужды [9].

Как показывают расчётные оценки, в ЭЯ-установках существует принципиальная возможность достижения значения собственного коэффициента усиления мощности равного или даже превышающего значение, достижимое в ГТЯР:

$$K = \eta_{yc} \cdot \eta_T \cdot \frac{E_q + E_{Pu}}{E_p} \approx 6 \div 8$$

Здесь:

$\eta_{yc} = 0,5$  - КПД линейного ускорителя протонов;

$\eta_T = 0,4$  - КПД преобразования тепловой энергии, выделяемой в мишени и blankets ЭЯ-установки;

$E_q$  - энергия, выделяемая в мишени и blankets ЭЯ-установки в расчёте на один протон ускорителя;

$E_{Pu}$  - энергетический эквивалент вторичного ядерного горючего, накапливаемого в blankets в расчёте на один протон;

$E_p$  - энергия протона на выходе из ускорителя.

То есть потенциальные возможности ЭЯ-установок, с точки зрения выработки наряду с горючим ещё и энергии для системы ЯЭ, не уступают возможностям ГТЯР. Более того, с инженерной точки зрения, blankets ЭЯ-установки в отличие от blankets ГТЯР не связан жестко в единую конструкцию с ускорителем и по существу представляет из себя подкритический реактор деления.

В результате ЭЯ установка имеет преимущественно перед ГТЯР с точки зрения достижимых температур теплоносителя, а, значит, и КПД термодинамического цикла. По мере работы ЭЯ-установки и повышения содержания вторичного горючего в blankets коэффициент утилизации мощности может быть существенно увеличен.

Что касается blankets ГТЯР, то с различных точек зрения (проблема удержания трития, проблема первой стенки, защита сверхпроводящих обмоток) целесообразно температуру, удельное теплоделение и уровень накопления горючего в blankets ГТЯР иметь пониженными. Для blankets ЭЯ-установок такие ограничения отсутствуют в принципе.

Ниже рассматривается ЭЯ-установка, характеризуемая величиной наработки вторичного ядерного горючего  $z_{ЭЯ} = 1 \text{ кг Pu/МВт-эл.год}$ . Такая установка потребляет на собственные нужды  $\sim 1500 \text{ МВт-эл}$  и выдает в систему ЯЭ вторичного ядерного горючего  $600 \text{ кг Pu/год}$  при полезной электрической мощности установки в целом  $600 \text{ МВт-эл}$  ( $\eta_T = 0,40$ ). Т.е. полная тепловая мощность blankets и blankets такой установки составляет  $3000 \text{ МВт-эл}$ .

Рассматриваемый вариант ГТЯР, характеризуемый величиной наработки вторичного ядерного горючего  $z_{ГТЯР} = 2,7 \text{ кг Pu/МВт-эл.год}$ , выдает в систему ЯЭ  $\approx 4100 \text{ кг Pu/год}$  ( $13,7 \text{ кг/день}$ ) при полезной электрической мощности АЭС с ГТЯР  $\sim 1500 \text{ МВт-эл}$  (КПД = 30%).

Как показано на рис. 5, при относительных суммарных затратах быстрых реакторов, лежащих в области  $1,33 \leq \frac{C_6}{C_7} \leq 2$ , границы допустимых суммарных затрат для альтернативных бридеров лежат в области:

$$\text{для ЭЯ} \quad 0,9 \leq \frac{C_u}{C_6} \leq 1,25,$$

$$\text{для ГТЯР} \quad 0,9 \leq \frac{C_u}{C_6} \leq 1,8$$

Несмотря на то, что темп наработки плутония в гибридных реакторах существенно превышает темп наработки в ЭЯ установках,  $\frac{z_{ГТЯР}}{z_{ЭЯ}} = 2,7$ , относительная величина суммарных затрат для ГТЯР и ЭЯ меняется в пределах:

$$1 \leq \frac{C_u^{ГТЯР}}{C_u^{ЭЯ}} \leq 1,44.$$

При  $\frac{C_6}{C_7} = 1,33$ . Т.е. при равных суммарных затратах быстрого и теплового реактора в расчёте на  $1 \text{ МВт-эл}$  (с учётом соответствующих значений КПД  $\eta_6 = 40\%$  и  $\eta_7 = 30\%$ ) суммарные затраты альтернативного бридера не должны превышать соответствующую величину для быстрого реактора.

#### IV. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложенная методика системного анализа потенциальных возможностей альтернативных бридгов в многокомпонентной модели ядерной энергетики позволяет определить границы допустимого соотношения их суммарных затрат в расчёте на 1 МВт-эл. по отношению к суммарным затратам быстрых реакторов в рамках замкнутой по топливу модели развития ЯЭ.

Анализ полученных соотношений показывает, что в рассматриваемой работе замкнутой по топливу модели ЯЭ практически нет достаточно реалистичных условий, при которых могут оказаться экономически выгодны специализированные наработчики вторичного ядерного горючего (ТТГР и ЗИ) без выработки наряду с горючим так же энергии для системы ЯЭ.

Одним из основных доводов в обоснование необходимости развития альтернативных бридгов состоит в требовании обеспечения приемлемой структуры ЯЭ будущего, в которой  $\sim 50 + 60\%$  энергии должно вырабатываться реакторами на тепловых нейтронах. Исследования показывают, что быстрые реакторы типа БИ с усовершенствованным топливом, например, с использованием металлического топлива, обеспечивают возможность развития замкнутой по топливу модели ЯЭ с указанной долей мощностей АЭС, тепловыми реакторами.

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Казачковский О.Д. Реакторы на быстрых нейтронах в атомной энергетике. "Природа", № 2, 1980, стр. 16-26.
2. Проблемы ядерного топлива и гибридные реакторы. - В сб. "Синтез-целение". Труды II советско-американского семинара. М., Атомиздат, 1978, стр. 5-14. Авт.: И.И.Половин, Р.М.Колбасов, В.В.Орлов и др.
3. Proceedings of an Information Meeting on Accelerator-Breeding. New-York 18-19 January 1977. CONF-770107 BNL, p. 316-327, 1978.
4. St.O.Schriber.  
Electronuclear fuel production using high intensity accelerators. Atomkernenergie, 32, № 1, 1978, p. 49-53.
5. Расчётные исследования возможности улучшения характеристик быстрых реакторов в двухкомпонентной модели ядерной энергетике. Препринт ЭЭМ-1036, Обнинск, 1980, стр.18.  
Авт.: В.Г.Ильини, В.С.Каграманян, В.М.Дурогов, В.Я.Рябцов, А.Н.Кемелёв.
6. Изучение возможности использования низкотемпературного металлического топлива в ядерных реакторах на быстрых нейтронах.  
В кн.: "Состояние и перспективы работ по созданию АЭУ с реакторами на быстрых нейтронах". Сб. докладов II Синтез-целение семинара членов СЭВ. Обнинск, 1973 г. Обнинск, Изд. СЭВ, 1975, стр. 14-15.  
Авт.: В.Г.Ильини, И.А.Кузнецов, В.М.Дурогов и др.
7. Структура атомной энергетики с учётом производства урана помимо электричества. - "Атомная энергия", т. 49, вып. 6, 1977, с. 427-432. Авт.: А.П.Александров, В.А.Легасов, В.А.Сидоренко и др.
8. F.R.Munnatt.  
Analysis of accelerator breeder concepts with MFRB, GCFR and Molten Salt-type blankets. Proceedings of an Information Meeting on Accelerator Breeding. Held at BNL, Upton, New-York 11977, 18-19 January 1977, CONF- 770107, p.85-106.
9. P.Grand et al. Linear Accelerator Reactors. BNL-50766, 1979.

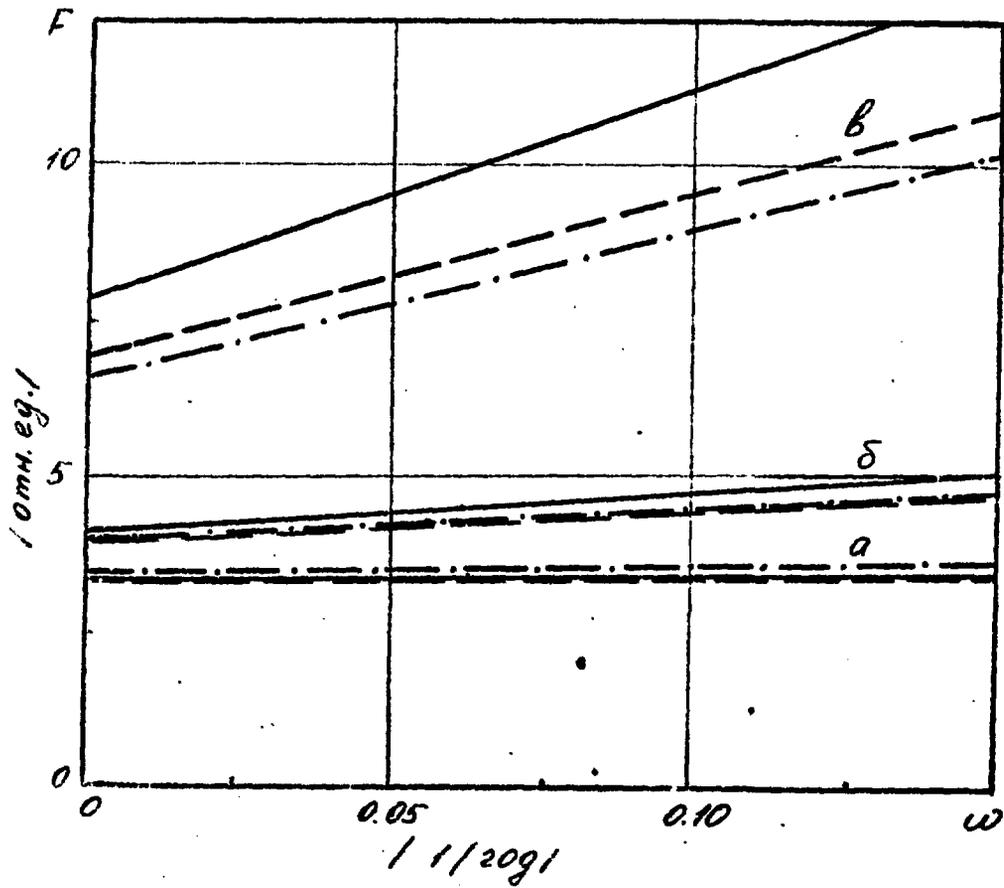


Рис. 1. Изменение стоимости электроэнергии (отн. ед.) в системе ЯЭ в зависимости от необходимых темпов развития системы,  $\omega$  (1/год) для различных соотношений суммарных затрат для ТР и БР:

а -  $C_6/C_7 = 1,33$ ,

б -  $C_6/C_7 = 2,00$ ,

в -  $C_6/C_7 = 5,00$

———— БР с оксидным топливом, - - - - БР с совместным использованием металлического и оксидного топлива, — · — · — БР с металлическим топливом (см. табл. I).

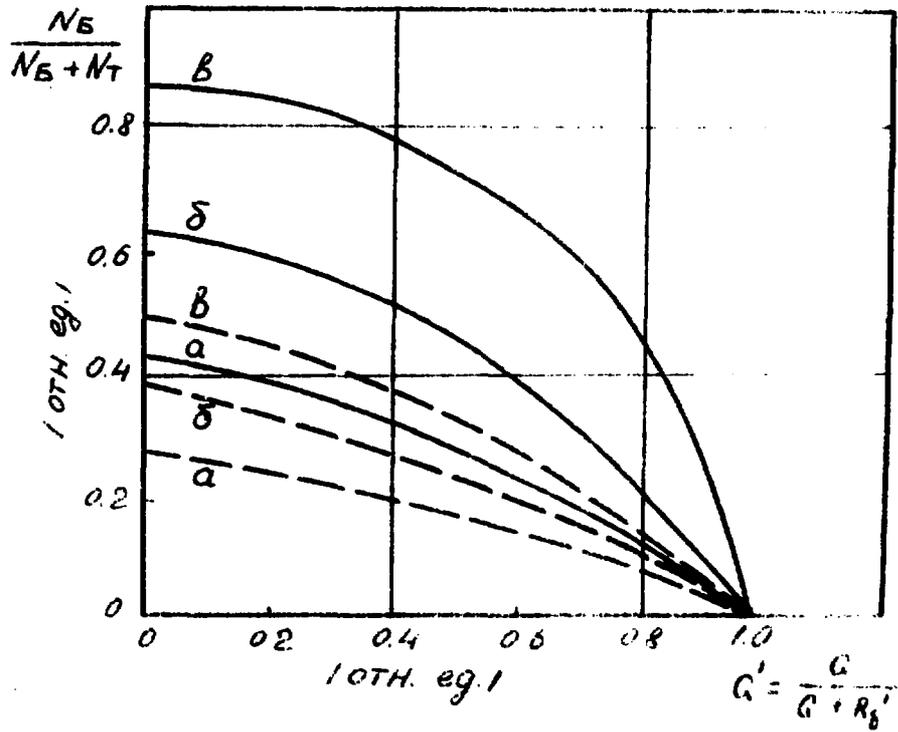


Рис. 2. Зависимость доли тепловых мощностей БР в системе ЯЭ,  $N_B / (N_B + N_T)$  (отн. ед.), от необходимого тепла развития системы,  $W$ , и от относительного вклада дополнительного источника ядерного топлива  $G'$  (отн. ед.):  
а -  $W = 0,0$   
б -  $W = 0,05$   
в -  $W = 0,10$

———— БР с оксидным топливом,  
- - - - - БР с металлическим топливом.

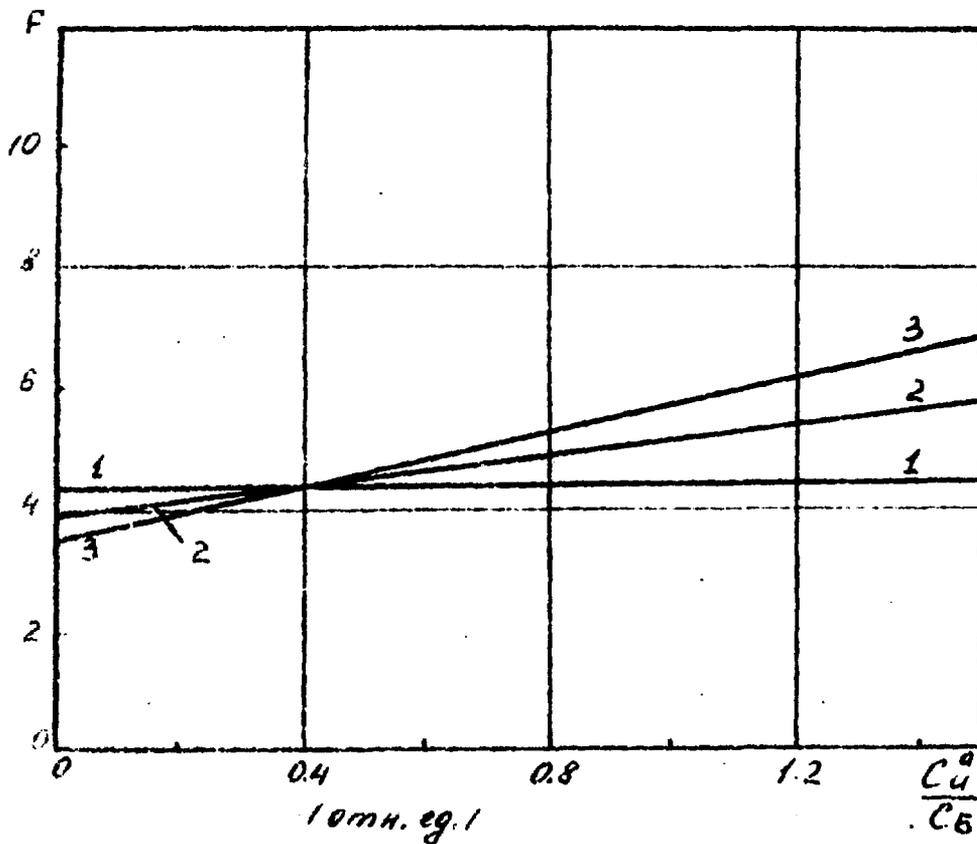


Рис. 3. Изменение стоимости электроэнергии  $F$  (отн. ед.),  
вырабатываемой в системе ЯЭ от изменения соотношения  
суммарных затрат для специализированного генератора  
( $1 - \xi = 0$ ) и быстрого реактора,  $C_u^a / C_B$  (отн. ед.)  
при  $C_d / C_t = 2,0$  и  $\omega = 0,05$  для различной структуры  
системы:  
1, 2, 3 - варианты структуры из таблицы 2.

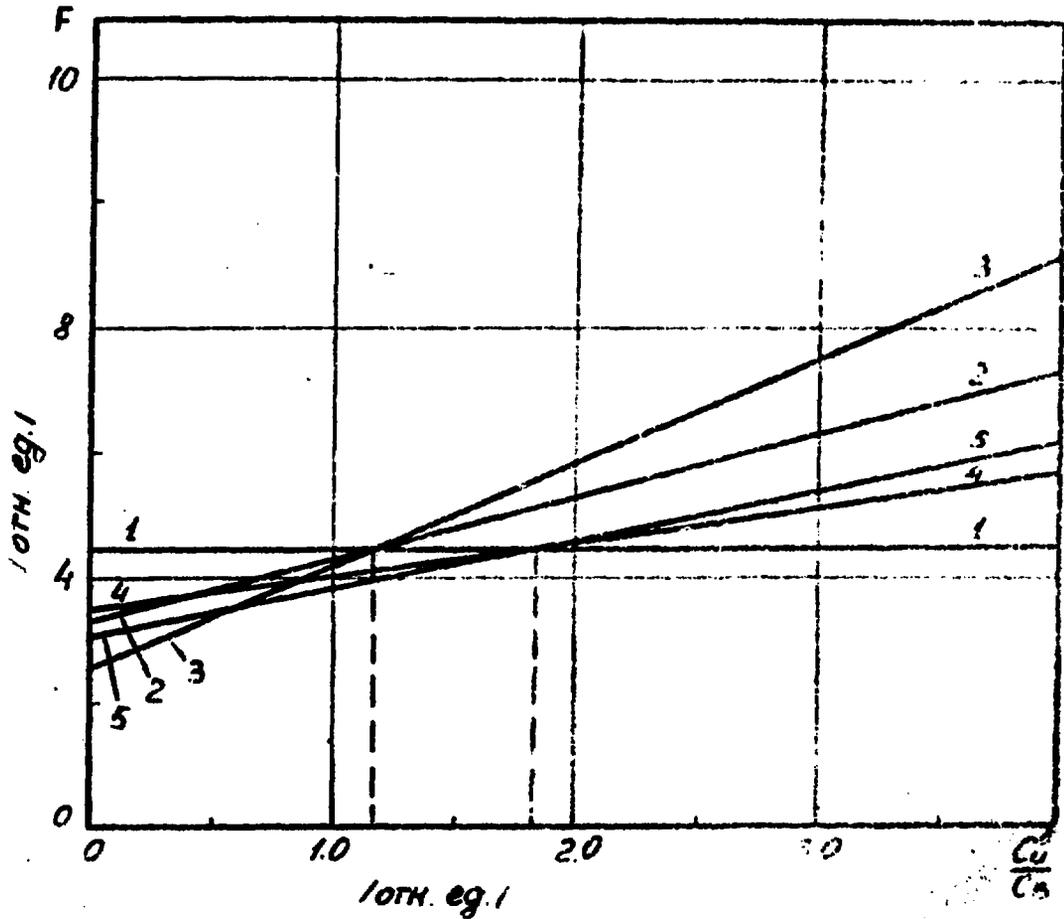


Рис. 4. Изменение стоимости электроэнергии  $F$  (отн. ед.),  
вырабатываемой в системе ЯЭ от изменения соотношения  
суммарных затрат для альтернативных двухуровневых блоко-  
ров (ГТЯР  $Z = 2,7$  кг/МВт-эл(нетто) и ЭЯ  $Z = 1,0$  кг/МВт  
-эл. (нетто)) и быстрого реактора  $C_0/C_1$  (отн. ед.) при  
 $C_6/C_7 = 2$  и  $\omega = 0,05$  для вариантов различной  
системы ЯЭ.

1, 2, 3, 4, 5 - см. варианты таблиц 4.

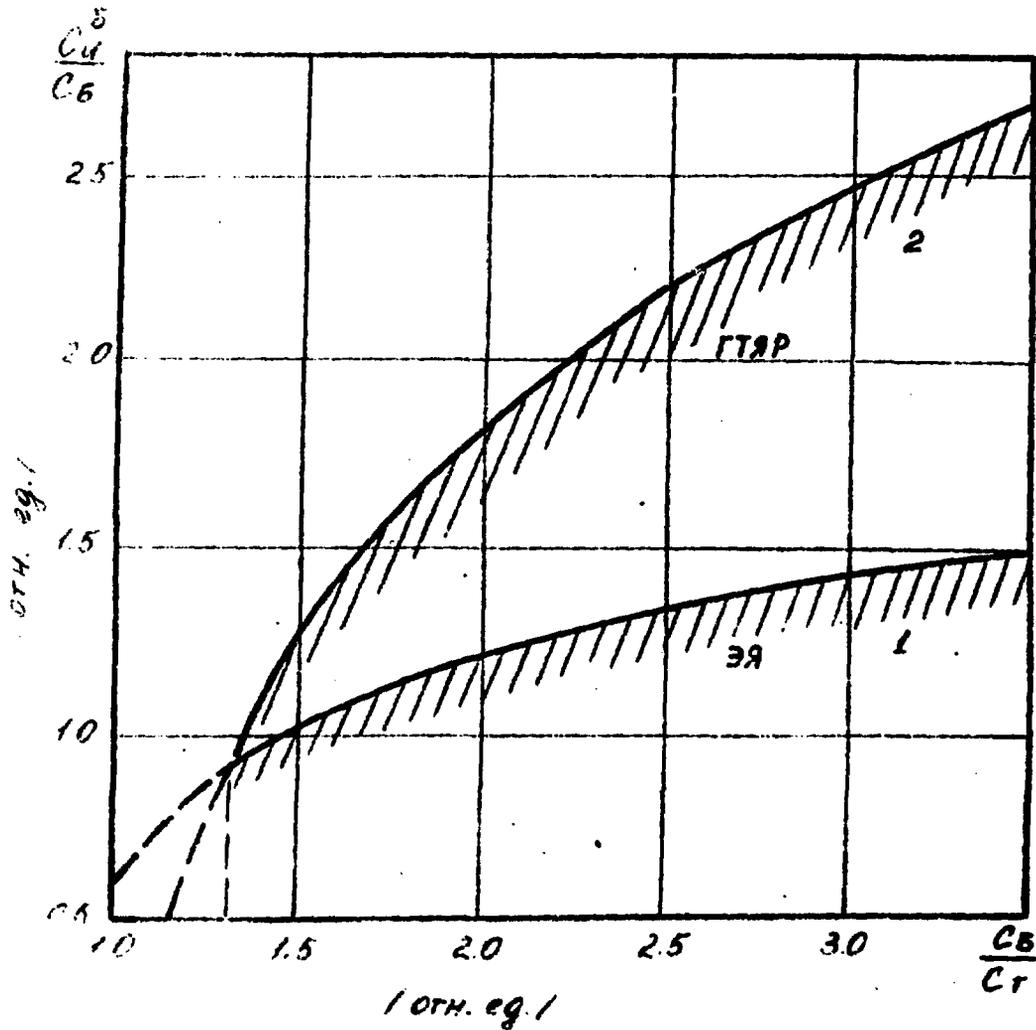


Рис. 5. Изменение границы конкурентоспособности альтернативных бридеров,  $C_u/C_s$ , в зависимости от соотношения суммарных затрат АЭС с быстрыми и тепловыми реакторами,  $C_b/C_t$  :

1 - электрондерная установка:  $\gamma = 1$  [кг Рн/МВт-эл. (нетто).год,]

2 - гибридный термоядерный реактор;

$\gamma = 2,7$  [кг Рн-МВт-эл(нетто).год.]

Технический редактор Н. П. Герасимова

Подписано в печать 27/IV-1981 г. Т - 06896 Формат 60 x 90 1/16

Офсетная печать Усл. п. л. 1,3 Уч.-изд. л. 0,8 Тираж 96 экз.

Заказ 637 Цена 8 коп. Индекс 3624 ФОН - 1192

Отпечатано на ротарипите ФЭИ, г. Обнинск

**8 коп.**

**Индекс 3624**

**Анализ потенциальных возможностей бридеров различного типа в многокомпонентной модели ядерной энергетики. ФЭИ-1192, 1981, 1-19.**