

того, чтобы все тепловые реакторы доработали свой срок службы (30 лет).

Использование быстрых реакторов позволяет снизить расход природного урана почти втрое по сравнению с одними реакторами ЛВР. Задержка с вводом быстрых реакторов вызывает возрастание расхода урана более чем на 20% (варианты 6 и 10). Существенную роль играет использование во второй и третьей декадах быстрых урановых реакторов БОП вместо ЛВР. Благодаря большому количеству вырабатываемого в этом случае плутония плутониевые реакторы более предпочтительнее, чем реакторы ЛВР, и в определенный момент времени они не только переходят на самоподпитку, но и дают возможность заменять урановые быстрые реакторы на плутониевые за счет того, что появляется избыток плутония, так как темп развития постепенно снижается.

Существенная экономия природного урана может быть получена при использовании тяжелых топливных тепловых реакторов ТВР во 2-й и 3-й декадах вместо реакторов ЛВР; в варианте 5 расход снижается на 45% по сравнению с вариантом 2.

Снижение  $\phi$  в небольших пределах в вариантах с тепловыми реакторами не только не вызывает повышения расхода урана, но, наоборот,

расход урана снижается за счет снижения расхода по реакторам ЛВР. Из сравнения вариантов 3 и 4 следует, что если  $\phi$  снижается до 0,7 одновременно в тепловых и быстрых реакторах, то увеличение расхода за счет ухудшения воспроизводящих свойств быстрых реакторов в данном случае невелико и составляет всего 2% по сравнению с тем случаем, когда снижение  $\phi$  производится только в тепловых реакторах. Изменение величины КВ на  $\pm 0,1$  вызывает сравнительно небольшие изменения суммарного расхода урана (в пределах  $\pm 10\%$ ).

Суммарное потребление урана за 30 лет при развитии ядерной энергетики с использованием быстрых реакторов значительно ниже, чем с использованием одних тепловых реакторов. В дальнейшем при улучшении характеристик быстрых реакторов и сокращении времени внешнего топливного цикла это преимущество быстрых реакторов проявится еще сильнее.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. А. И. Лейпунский. «Атомная энергия», 28, 297 (1970).
2. С. М. Фейнберг. «Атомная энергия», 25, 363 (1968).
3. Illustrative Power Reactor Programmes. ENEA, May 1968.
4. F. Dawson et al. Nucleonics, 23, No. 8, 101 (1965).

## К вопросу о выборе параметров большого быстрого реактора

О. Д. КАЗАЧКОВСКИЙ, Н. В. КРАСНОЯРОВ, Р. В. НИКОЛЬСКИЙ, Е. А. ГРАЧЕВ,  
Т. М. ЗИГАНШИН, Е. В. КИРИЛЛОВ, Р. Е. СЕГЛЕЦОВА (СССР)

УДК 621.039.536

Критерием оптимальности выбора основных параметров АЭС с быстрыми реакторами должна быть минимальная стоимость электроэнергии, при которой обеспечивается необходимое время удвоения. С этих позиций такие характеристики АЭС, как средняя теплонпряженность, уплощение активной зоны, коэффициент воспроизводства, термический к. п. д. и др., рассматриваются в качестве параметров, нуждающихся в оптимизации [1,2].

Полная мощность АЭС, средний подогрев и максимальная температура теплоносителя определяют как теплотехнические, так и физические характеристики установки. Для их выбора необходима комплексная оптимизация станции.

Опыт проектирования и строительства АЭС с реакторами БН-350 и БН-600 дает основания полагать, что единичная мощность станции

1000–1500 Мвт (э.) представляется сейчас вполне разумной [1]. Установки такой мощности позволяют снизить удельные капитальные затраты и топливную составляющую стоимости энергии по сравнению с БН-350 и БН-600.

Как отмечалось в работе [2], при создании быстрых энергетических реакторов экономически нецелесообразно ориентироваться на самые высокие параметры термодинамического цикла. С учетом этого окончательный выбор параметров цикла необходимо производить в результате принятия компромиссного решения. С одной стороны, при снижении температур появляется экономический выигрыш вследствие увеличения надежности и роста коэффициента воспроизводства; с другой стороны, снижается к. п. д. из-за ухудшения параметров пара.

Энергонапряженность и уплощение активной зоны, толщина экранов, способы выравнивания

энерговыведения определяют в основном затраты на топливный цикл и поэтому могут быть выбраны независимо от параметров термодинамического цикла.

В связи с этим дальнейшее изложение материала может быть условно разбито на две части.

### О выборе термодинамических параметров АЭС

Основными параметрами являются температура натрия на выходе из реактора и средний подогрев в реакторе. В настоящее время нет еще данных для окончательного определения оптимальной величины этих параметров, поскольку нет еще опыта надежности работы основного оборудования. Однако отдельные тенденции могут быть проверены с помощью расчетов.

Рассмотрим задачу о выборе оптимального подогрева теплоносителя при фиксированной температуре на выходе из реактора с учетом факторов перегрева при постоянной мощности реактора. В табл. 1 факторы, действующие в сторону повышения и понижения оптимального подогрева, разделены на две группы.

В выполненных численных расчетах учитывались факторы 1) и 2) первой группы факторов и фактор 1) второй группы. Важнейшие исходные данные АЭС при использовании для топливного материала активной зоны  $UO_2 + PuO_2$  приведены в табл. 2.

Группировка конкурирующих факторов, определяющих оптимальный подогрев

Таблица 1

I. Повышение подогрева позволяет	На какие статьи затрат влияет фактор и как	II. Снижение подогрева позволяет	На какие статьи затрат влияет фактор и как
1) повысить объемную долю горючего (снизить долю теплоносителя), что ведет к: а) увеличению диаметра твэлов и сокращению их общего количества; б) увеличению коэффициента воспроизводства; 2) уменьшить расходы на прокачку теплоносителя; 3) сократить число подогревателей питательной воды; 4) изготовить отдельные элементы оборудования, например экономайзерный участок парогенератора, отдельные трубопроводы из менее качественных сталей; 5) повысить общую надежность станции	снижаются расходы на изготовление и переработку горючего (ТС) снижается ТС снижаются эксплуатационные расходы (ЭС) снижается капитальная составляющая (КС) снижается КС	1) повысить к. п. д. станции; 2) повысить надежность (из-за меньшей опасности тепловых ударов); 3) снизить влияние распухания стали и горючего на максимально допустимые температуры	снижаются ТС и КС снижается КС снижается ТС и КС
5) повысить общую надежность станции	снижаются КС и ТС		

К. п. д. рассчитывался для термодинамического цикла АЭС с турбиной единичной мощностью 500 Мвт и давлением пара 160—130 атм. Изменение расходов на прокачку теплоносителя учитывается в величине к. п. д. станции.

Основные результаты расчетов даны в табл. 3.

Результаты расчетов свидетельствуют о следующем. Затраты на горючее благодаря увеличению КВ и  $d_{твэл}$  заметно снижаются, несмотря на уменьшение при этом к. п. д. и теплонапряженности. Более того, эффект повышения КВ и диаметра твэла, приводящий к снижению ТС (с учетом уменьшения к. п. д. и  $Q$ ), оказывается более сильным, чем эффект снижения тепловой экономичности, приводящий к росту КС. В итоге конкуренции этих эффектов полная стоимость электроэнергии в заданном интервале варьирования  $\Delta T$  снижается с ростом подогрева.

Аналогичные расчеты были выполнены также для гипотетического варианта с давлением пара 90 атм. Оказалось, что для такого давления пара при атмосферной деаэрации воды можно реализовать подогрев в реакторе значительно выше 250° С. Причем оптимальный подогрев (по минимуму полной стоимости электроэнергии) составил 260—270° С.

Полученные количественные результаты подтверждают ранее сделанные выводы принципиального характера об оптимальной величине термических параметров АЭС с быстрым реактором. Считаем необходимым также обратить

Исходные данные для расчета

Таблица 2

Параметр	Величина
Тепловая мощность $W_T$ , Мвт	3750
Температура на выходе из реактора $T_{\text{вых}}$ , °С	530
Удельная мощность $Q$ , квт/л	500
Уплотнение $\beta$	0,4
Средняя глубина выгорания, %	10

ТС от теплонапряженности и уплотнения имеется оптимум. Это можно продемонстрировать на примере расчетов, проведенных с помощью методов, изложенных в работе [3].

Для реактора с оксидным плутониевым горючим рассматривались изменения  $200 \leq Q$  [квт/л]  $\leq 800$  и  $0,1 \leq \beta \leq 1$ . Была получена зависимость ТС от  $Q$  и  $\beta$ , которая выразилась следующим аппроксимационным уравнением для  $W = 5000$  Мвт:

$$TC [\text{коп} \cdot 10^{-1} / \text{квт} \cdot \text{ч}] = 0,6255 + 1,35 \cdot 10^{-3} Q + \\ + 1,91 \cdot 10^{-3} \beta + 4,85 \cdot 10^{-3} Q \cdot \beta + \\ + 9,188 \cdot 10^{-3} Q^2 + 6,138 \beta^2,$$

Результаты расчетов

Таблица 3

Показатели	$T_{\text{вых}} = 530^\circ \text{C}$		
	$\Delta T = 200^\circ \text{C}$	$\Delta T = 230^\circ \text{C}$	$\Delta T = 245^\circ \text{C}$
К. п. д. станции (нетто), %	40,4	39,7	39,4
Доля горючего	0,34	0,39	0,41
Коэффициент воспроизводства (КВ)	1,44	1,48	1,49
Диаметр и толщина оболочки твэла, мм	$5,8 \times 0,3$	$6,3 \times 0,3$	$6,5 \times 0,3$
Теплонапряженность $Q$ , Мвт(т)кг	1,61	1,52	1,49
Полная стоимость электроэнергии, % в том числе:	100	98,0	97,5
капитальная и эксплуатационная составляющие (КС+ЭС), %	100	102,0	103,0
топливная составляющая (ТС), %	100	88,0	84,0
Доля ТС в полных затратах, %	29,0	26,0	25,0

которое является уравнением эллиптического параболоида. На рисунке показаны сечения этого параболоида при  $TC = 0,063 \div 0,067$  коп/квт·ч. Видно, что уплотнение и средняя электроннапряженность могут существенно изменяться, не приводя к заметному возрастанию ТС. Оптимальные значения  $Q$  и  $\beta$  лежат в следующих диапазонах:  $Q = 300 \div 500$  квт/л,  $\beta = 0,3 \div 0,4$ . Влияние тепловой мощности на форму оптимума несущественно, хотя абсолютное значение ТС минимально для большей мощности. Эти выводы показывают на возможный диапазон изменения средней напряженности и уплотнения для большого реактора. При прочих равных условиях более выгодна высокая напряженность, поскольку при этом размеры бака реактора минимальны.

**Параметры экранов.** Расчеты показывают, что характеристики активной зоны большого быстрого реактора можно считать не зависящими от толщины и материалов экранов.

Наличие оптимума (по минимуму ТС) толщины бокового ( $\Delta$  б. э.) и торцового экранов ( $\Delta$  т. э.) обуславливается тем фактом, что при их увеличении возрастает коэффициент воспроизводства. В то же время объем работ по переработке и изготовлению пакетов экрана возрастает. Оптимум по минимуму ТС среднего времени нахождения плутония в боковом экране ( $T_{\text{э.б}}$ ) определяется конкуренцией двух факторов: начисления на плутоний, приводящего к снижению этого времени, и снижения затрат на изготовление и переработку, приводящего к увеличению этого времени.

Расчетные исследования проводились для реактора мощностью 2500 Мвт (т) с оксидным плутониевым горючим, имеющего среднюю теплонапряженность 350 — 500 квт/л. Рассматривалась оптимальная толщина металлического

внимание на то, что в численном расчете учитывались далеко не все факторы, действующие в сторону повышения оптимального подогрева (снижения средней температуры в реакторе).

### Выбор параметров активной зоны и экранов реактора

**Средняя теплонапряженность ( $Q$ ) и уплотнение ( $\beta$ ).** Средняя теплонапряженность и уплотнение  $\beta = H/D$  ( $H$  и  $D$  — высота и диаметр активной зоны соответственно) при заданной тепловой мощности установки определяют размеры бака реактора и другие величины, влияющие в основном на топливную составляющую расчетных затрат (ТС). В зависимости

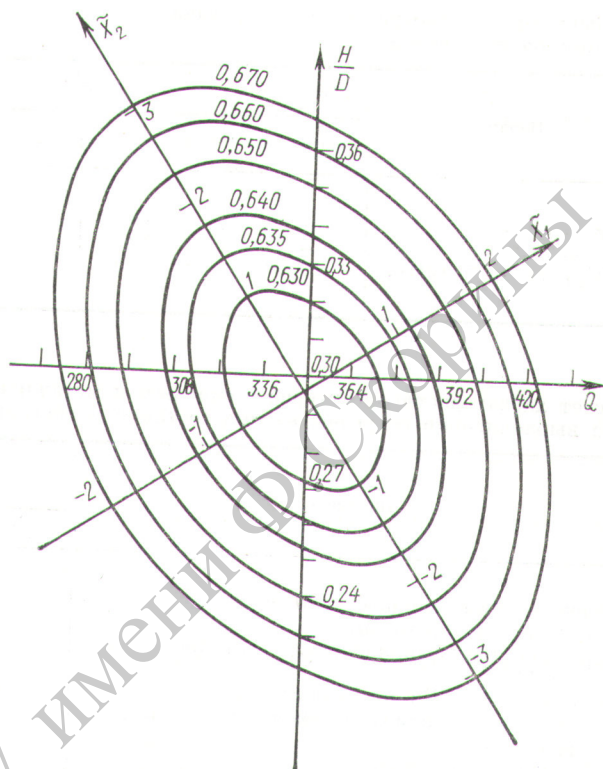
и окисного экранов, а также оптимальное время нахождения вторичного плутония в боковом экране. Принималось, что перегрузка для однозонного, двухзонного и трехзонного бокового экранов происходит без перестановок пакетов из одной зоны в другую. Были найдены максимально возможные (при любых значениях стоимостных показателей) оптимальные значения толщин экранов, которые в зависимости от вида материала экранов и удельной мощности (350—500 *квт/л*) колеблются от 0,4 до 0,5 м. Оптимальные значения параметров экрана представлены в табл. 4.

Металлический экран по значению  $ТС_{эк}$  почти не уступает окисному в предположении, что удельные расходы на изготовление их одинаковы.

Исследования однозонной, двухзонной и трехзонной перегрузок бокового экрана показали, что оптимальная толщина его не зависит от способа перегрузки, как это показано в табл. 5.

Оптимальное время нахождения плутония в боковом экране практически совсем не зависит от количества зон с учетом того, что оптимальная толщина бокового экрана в многозонном варианте больше, чем в однозонном. Применение многозонных вариантов бокового экрана не дает заметных экономических преимуществ по сравнению с однозонным. Дело в том, что при уменьшении среднего времени нахождения  $P_u$  во внутренних слоях экрана (для снижения начислений на него) одновременно сокращается и кампания их, что увеличивает расходы на изготовление и переработку. Применение зонной перегрузки бокового экрана может оказаться необходимым лишь при наличии технических ограничений на время нахождения пакетов экрана в реакторе.

**Способы выравнивания поля энерговыделения.** Получение в активной зоне реактора стабильного и выровненного поля энерговыделения является важным средством улучшения экономических показателей больших быстрых реакторов [4]. Способы выравнивания энерговыделения существенно определяют свойства быстрого реактора и как энергетического объекта, и как размножителя ядерного горючего. Выравнивание можно осуществить двумя путями: изменением обогащения делящегося изотопа и изменением объемной доли горючего при постоянном обогащении делящимся изотопом. Первый способ принято называть способом выравнивания обогащением, второй — способом выравнивания составом [4].



Зависимость  $ТС$  от теплонапряженности  $Q$  [*квт/л*] и уплощения  $\beta = H/D$ .

Конструктивно метод выравнивания тепловыделения составом может быть осуществлен путем изменения: а) шага твэлов, б) диаметра твэлов, в) плотности горючего, г) плотности горючего с заполнением пустот инертным разбавителем. В методе выравнивания составом в отличие от метода выравнивания обогащением поле тепловыделения в процессе кампании практически не меняется, поскольку коэффициенты воспроизводства зон близки друг к другу.

Значения параметров экрана

Таблица 4

Параметр	Окисный экран		Металлический экран	
	350 <i>квт/л</i>	500 <i>квт/л</i>	350 <i>квт/л</i>	500 <i>квт/л</i>
$\Delta_{т.э.}$ , м	0,380	0,395	0,255	0,265
$\Delta_{б.э.}$ , м	0,360	0,400	0,250	0,285
$T_{б.э.}$ , лет	2,15	1,82	2,45	2,20
$ТС_{эк}$ , $коп \cdot 10^{-1} / \text{квт} \cdot \text{ч}$	-0,452	-0,620	-0,460	-0,608

Зависимость параметров бокового экрана от способа перегрузки

Таблица 5

Параметр	Экран металлический ( $Q = 500 \text{ кВт/л}$ )			Экран окисный ( $Q = 500 \text{ кВт/л}$ )		
	одна зона	две зоны	три зоны	одна зона	две зоны	три зоны
$\Delta_{б. \text{ э.}}$ , м	0,285	0,300	0,305	0,400	0,410	0,415
$T_{б. \text{ э.}}$ , лет	2,2	2,16	2,15	1,82	1,80	1,79
$ТС_{\text{ЭР}}$ , $\text{коп} \cdot 10^{-1} / \text{кВт} \cdot \text{ч}$	-0,608	-0,617	-0,619	-0,620	-0,627	-0,630

Расчет характеристик реакторов с окисным и металлическим горючим при выравнивании энерговыделения составом и обогащением

Таблица 6

Параметр	Реакторы с окисным горючим		Реакторы с металлическим горючим	
	составом	обогащением	составом	обогащением
Электрическая мощность, $M_{\text{эл}}$	1500	1500	1500	1500
Тепловая мощность, $M_{\text{тп}}$	4000	4000	4000	4000
Средняя теплонапряженность активной зоны, $\text{кВт/л}$	500	500	500	500
Средний подогрев теплоносителя, °С	270	270	270	270
Средняя температура теплоносителя на выходе из реактора $T_{\text{вых}}$ , °С	530	530	530	530
Уплощение активной зоны	0,3	0,3	0,3	0,3
Глубина выгорания средняя, %	~ 5,8	~ 5,8	~ 2,9	~ 2,9
» » максимальная, %	10	10	5	5
Диаметр твэла ( $d_{\text{твэл}}$ ), мм	6	6,5	5,2	5,3
Средняя доля горючего в активной зоне ( $\epsilon_T$ )	0,441	0,532	0,363	0,437
Коэффициент конверсии в активной зоне (КВА)	0,60	0,67	0,81	0,89
Коэффициент конверсии реактора (КВ)	1,00	1,05	1,16	1,23
Критическая масса ( $G_{\text{кр}}$ ), т	3,73	3,98	4,79	5,32
Топливная составляющая расчетных затрат (ТС), $\text{коп/кВт} \cdot \text{ч}$	0,128	0,110	0,202	0,192

В табл. 6 представлены результаты расчетов характеристик реакторов с окисным и металлическим урановым горючим, в которых выравнивание энерговыделения осуществлялось составом (количеством твэлов в пакете) и обогащением.

Из табл. 6 следует, что для рассматриваемых значений средней глубины выгорания коэффициент воспроизводства, диаметр твэла и средняя объемная доля горючего выше для способа выравнивания обогащением. Это обеспечивает и лучшие его экономические показатели по величине ТС.

Рассмотрим коротко результаты расчетов, показывающие относительную эффективность различных методов выравнивания с точки зрения изменения формы энергораспределения и запаса реактивности в процессе кампании, а так-

же величины среднего выгорания выгружаемого горючего. Расчеты проводились для двухзонных цилиндрических реакторов с объемом активной зоны 5700 л, средней теплонапряженностью  $Q = 500 \text{ кВт/л}$  и окисидным плутониевым горючим. Уплощение активной зоны 0,3. Принималось, что сравниваемые профилированные реакторы имеют одинаковые средние объемные доли горючего в активной зоне  $\bar{\epsilon}_T$ . Это приближение позволяет, не усложняя расчетов, получить ответ на поставленный вопрос.

Для способа выравнивания составом отношение объемной доли горючего во второй зоне к объемной доле в первой зоне варьировалось в пределах  $\epsilon_T^{\text{II}} / \epsilon_T^{\text{I}} = 1,3 \div 1,7$ . Наибольшая средняя глубина (при заданной максимальной) выгорания достигается при  $\epsilon_T^{\text{II}} / \epsilon_T^{\text{I}} = 1,6$ , что

Характеристики профилированных реакторов

Таблица 7

Основные характеристики	Профилированные обогащением		Профилированные составом									
			диаметром твэлов			шагом твэлов			плотностью топлива			
$\epsilon_T^{II}/\epsilon_T^I$	1,3		1,6			1,6			1,4			
КВА	0,82		0,81			0,80			0,81			
$V_{max}$ (%)	5	10	15	5	10	15	5	10	15	5	10	15
$\frac{\Delta K_{эф}}{K_{эф}}$ (%)	-1,6	-3,0	-4,3	-2,0	-3,8	-5,4	-2,0	-3,8	-5,4	-2,5	-4,4	-6,2
$\frac{\Delta K_r}{K_r}$ (%)	-4,30	-0,40	+3,50	-0,42	-0,74	-1,10	-0,56	-0,9	-1,2	+0,07	+0,07	-0,68
$\bar{B}$ (%)	2,97	6,25	9,10	3,00	5,80	8,70	3,00	5,85	8,80	3,20	6,40	9,75
Кампания (лет)	0,375	0,796	1,200	0,375	0,752	1,150	0,425	0,775	1,200	0,400	0,845	1,290

соответствует максимальной кампании активной зоны. Это получается для всех способов выравнивания, кроме профилирования плотностью, когда оптимально с этой точки зрения  $\epsilon_T^{II}/\epsilon_T^I \cong 1,4$ . Для способа выравнивания обогащением минимальный коэффициент неравномерности достигается при соотношении концентраций делящегося изотопа в зоне к аналогичной величине в первой зоне  $\rho^{II}/\rho^I = 1,3$ . Эти выводы не зависят от величины средней энергонапряженности и максимальной глубины выгорания.

Расчеты показали, что все методы выравнивания составом оказываются равноэффективными с точки зрения получения стабильного в процессе кампании энергораспределения. Для метода профилирования обогащением горючего имеет место существенное выравнивание энергораспределения, как это видно из табл. 7, по относительному изменению коэффициента неравномерности  $\Delta K_r/K_r$ .

Все рассмотренные методы профилирования обеспечивают приблизительно равное среднее выгорание горючего за кампанию, хотя некоторое предпочтение можно отдать профилированию плотностью. Изменение реактивности в процессе кампании минимально для способа

выравнивания обогащением, имеющего наиболее высокий внутренний коэффициент воспроизводства.

Следует отметить, что для металлического горючего значение КВА может превышать единицу при способе выравнивания обогащением. (Так, для реактора, представленного в табл. 6, в бридерном режиме КВА=1; 2 при способе выравнивания обогащением.) В этом случае способы выравнивания составом могут оказаться предпочтительнее.

ЛИТЕРАТУРА

1. А. И. Лейпунский и др. «Атомная энергия», 25 (1968).
2. О. Д. Казачковский, Е. В. Кириллов. К вопросу о критериях эффективности АЭС на быстрых нейтронах. Доклад на Конференции по быстрым реакторам. Обнинск, 1967 г.
3. О. Д. Казачковский. Применение статистических методов планирования решения многопараметрических экстремальных задач для оптимизации АЭС с реактором на быстрых нейтронах. Доклад на советско-бельгийско-голландском симпозиуме. Мелекесс, 1968 г.
4. А. И. Новожилов и др. Расчетные исследования физики больших быстрых реакторов. Доклад на конференции по быстрым реакторам. Обнинск, 1967 г.