

Оптимизация периода удвоения T_2 и топливной составляющей расчетных затрат Z_T в быстрых реакторах с помощью частичной перегрузки

ГРАЧЕВ Е. А., ДЕЙНЕГА Н. Л.

УДК 621.039.526.003:621.039.517

Различные способы частичной перегрузки выгоревшего горючего представлены в табл. 1.

Разовая перегрузка предполагает замену горючего во всем объеме активной зоны, после того как в наиболее напряженной области выгорание $\beta_k^{\max}$ достигло предельного значения $\beta_{\text{зад}}^{\max}$ или изменение реактивности уже составило предельную величину. Равномерно-частичная перегрузка (кратности N_1) означает, что удаляется $1/N_1$ -я часть кассет, равномерно распределенная по всему объему активной зоны. Зонная перегрузка — это удаление отдельной k -й зоны при $\beta_k^{\max} \leq \beta_{\text{зад}}^{\max}$. При зонно-частичной перегрузке разбиение на подзоны следующее: каждая k -я зона содержит число подзон перегрузки N_k , равное целой части отношения максимальных энергонапряженностей горючего зон 1 и k . В основу расчета положено применение известных формул для периода удвоения [1] и топливной составляющей [2].

Введем дополнительно следующие обозначения: $\bar{\beta}_k(t)$ — среднее выгорание соответственно

в k -й зоне; $\bar{\beta}_k^c$ — средняя скорость выгорания в k -й зоне, 1/год; ΔT — временной интервал между последующими перегрузками, год; κ_{rk} , κ_{zk} — радиальный и осевой зонные коэффициенты неравномерности энергораспределения соответственно; KBA_k , $KBT_{\text{з.}}$, $KB_{\text{б.з.}}$ — коэффициенты воспроизводства k -й активной зоны, торцового и бокового экранов соответственно; g_{0k} — начальная концентрация делящегося материала в пакете k -й зоны, кг/пакет; M_k — число пакетов в k -й зоне; $G_{\text{а.з.}}(t)$, $G_{\text{т.з.}}(t)$, $G_{\text{б.з.}}(t)$ — количество делящегося материала соответственно в активной зоне, торцовом и боковом экранах, кг; ϵ_{rk} , ϵ_r — доли горючего в k -й зоне и средняя во всей активной зоне соответственно; f — коэффициент нагрузки станции; $\alpha_{\text{рег}}$ — доля $G_{\text{а.з.}}$, находящаяся на перерабатывающем заводе; $N_{\text{б.з.}}$ — число перегрузочных зон бокового экрана; N — число совместно работающих реакторов.

Рассмотрим реактор, в котором имеется k зон перегрузок, каждая содержит N_k подзон. Принимаем, что скорость выгорания горючего в k -й зоне постоянна во времени, а изменения величин KBA_k , $KBT_{\text{з.}}$, $KB_{\text{б.з.}}$ во времени малы и не учитываются.

Интервал между последующими перегрузками должен определяться, как правило, временем, за которое в наиболее теплонапряженной зоне достигается максимальное выгорание. В общем же случае для любого способа перегрузок можно записать;

$$\Delta T = \frac{\beta_{\text{зад}}^{\max}}{N_1 \kappa_{r1} \kappa_{z1} \bar{\beta}_1^c} \quad (1)$$

Величины среднего выгорания горючего в k -й зоне в условиях стационарного режима для различных характерных моментов времени цикла облучение — перегрузка запишутся в виде

$$\beta_k = \beta_k^c \Delta T N_k, \quad (2)$$

Типы и параметры перегрузок

Таблица 1

Перегрузка	K^*	N_k	Выгружаемая доля объема активной зоны	$\beta_k^{\max}$
Разовая	1	1	1	$\beta_1^{\max} = \beta_{\text{зад}}^{\max}$
Равномерно-частичная	≥ 1	N_1	$\frac{1}{N_1}$	$\beta_1^{\max} = \beta_{\text{зад}}^{\max}$
Зонная	≥ 1	1	δ_k	$\beta_k^{\max} \leq \beta_{\text{зад}}^{\max}$
Зонно-частичная	≥ 1	$N_k > N_1$	$\Sigma \frac{\delta_k}{N_k}$	$\beta_k^{\max} \leq \beta_{\text{зад}}^{\max}$

* K^* — число зон реактора; N_k — число подзон k -й зоны, а для способа равномерно-частичной перегрузки — ее кратность; $\beta_{\text{зад}}^{\max}$ — максимально допустимое выгорание горючего; $\beta_k^{\max}$ — максимальное выгорание в k -й зоне; δ_k — доля объема активной зоны, занимаемая k -й зоной.

где

$$\beta_k = \begin{bmatrix} \bar{\beta}_k(0) \\ \bar{\beta}_k\left(\frac{\Delta T}{2}\right) \\ \bar{\beta}_k(\Delta T) \\ \bar{\beta}_k^{\text{выгр}}(\Delta T) \end{bmatrix}; \quad N_k = \begin{bmatrix} \frac{N_k - 1}{2} \\ \frac{N_k}{2} \\ \frac{N_k + 1}{2} \\ \frac{N_k}{2} \end{bmatrix}.$$

Вектор β_k содержит средние выгорания для следующих моментов: 0 — после перегрузки; $\frac{\Delta T}{2}$ — средний между перегрузками; ΔT — перед перегрузкой; «выгр» — выгружаемое горючее.

Далее получим зависимости, определяющие количества плутония в активной зоне, боковом и торцовом экранах для выбранных характерных моментов времени:

$$G_{a.з} = \hat{B}g, \quad (3)$$

где

$$G_{a.з} = \begin{bmatrix} G_{a.з}(0) \\ G_{a.з}\left(\frac{\Delta T}{2}\right) \\ G_{a.з}(\Delta T) \\ G_{a.з}^{\text{выгр}}(\Delta T) \end{bmatrix};$$

$$\hat{B} = \begin{bmatrix} [1 - B_1 \bar{\beta}_1(0)], \dots, [1 - B_k \bar{\beta}_k(0)] \\ [1 - B_1 \bar{\beta}_1\left(\frac{\Delta T}{2}\right)], \dots, [1 - B_k \bar{\beta}_k\left(\frac{\Delta T}{2}\right)] \\ [1 - B_1 \bar{\beta}_1(\Delta T)], \dots, [1 - B_k \bar{\beta}_k(\Delta T)] \\ [1 - B_1 \bar{\beta}_1^{\text{выгр}}(\Delta T)], \dots, [1 - B_k \bar{\beta}_k^{\text{выгр}}(\Delta T)] \end{bmatrix},$$

$$g = \begin{bmatrix} g_{01} M_1 \delta_1 \frac{\bar{\varepsilon}_{r1}}{\bar{\varepsilon}_r} \\ g_{0k} \cdot M_k \delta_k \frac{\bar{\varepsilon}_{rk}}{\bar{\varepsilon}_r} \end{bmatrix}.$$

Здесь $B_k = (1 - KBA_k)$ — второй член разложения в ряд решения уравнения выгорания горючего вида:

$$g_k(t) = g_{0k} \exp[-(1 - KBA_k) \bar{\beta}_k^c t]. \quad (4)$$

Аналогичные выражения для бокового и торцового экранов имеют вид:

а) для торцового экрана

$$G_{т.з} = \Delta T \hat{N} D_{т.з}, \quad (5)$$

где

$$D_{т.з} = \begin{bmatrix} g_{01} M_1 \bar{\beta}_1^c \delta_1 \frac{\bar{\varepsilon}_{r1}}{\bar{\varepsilon}_r} KB_{т.з1} \\ g_{0k} M_k \bar{\beta}_k^c \delta_k \frac{\bar{\varepsilon}_{rk}}{\bar{\varepsilon}_r} KB_{т.зk} \end{bmatrix};$$

б) для бокового экрана

$$G_{б.з} = \Delta T KB_{б.з} \sum_{k=1}^k g_{0k} M_k \sum_{k=1}^k \delta_k \bar{\beta}_k^c \frac{\bar{\varepsilon}_{rk}}{\bar{\varepsilon}_r} N_{б.з}, \quad (6)$$

где

$$N_{б.з} = \begin{bmatrix} \frac{N_{б.з} - 1}{2} \\ \frac{N_{б.з}}{2} \\ \frac{N_{б.з} + 1}{2} \\ \frac{N_{б.з}}{2} \end{bmatrix}.$$

В дальнейшем исследуется технологическая схема замкнутого топливного цикла, принятая в работе [3].

Определим количество плутония, стационарно находящегося в каждом из блоков схемы:

а) реактор

$$\bar{G}_p = G_{a.з} \left(\frac{\Delta T}{2} \right) + G_{т.з} \left(\frac{\Delta T}{2} \right) + G_{б.з} \left(\frac{\Delta T}{2} \right); \quad (7)$$

б) внутреннее хранилище

$$G_{вн.хр} = G_{a.з}^{\text{выгр}}(\Delta T) + G_{т.з}^{\text{выгр}}(\Delta T); \quad (8)$$

в) первое внешнее хранилище

$$\bar{G}_{1вн.хр} = \frac{1}{2N} [G_{a.з}^{\text{выгр}}(\Delta T) + G_{т.з}^{\text{выгр}}(\Delta T) + C_{б.з}^{\text{выгр}}(\Delta T)]; \quad (9)$$

г) перерабатывающий завод

$$\bar{G}_{рег} = \alpha_{рег} G_{a.з}(\Delta T); \quad (10)$$

д) второе внешнее хранилище

$$G_{2вн.хр} = \frac{1}{2N} \sum_{k=1}^k \frac{M_k g_{0k}}{N_k}. \quad (11)$$

Полная загрузка в цикл определяется суммированием полученных количеств:

$$G_{ц} = \bar{G}_p + \bar{G}_{вн.хр} + \bar{G}_{1вн.хр} + G_{рег} + G_{2вн.хр}. \quad (12)$$

Скорость накопления избыточного плутония в реакторе запишем в виде

$$M_{Pu} = \sum_{k=1}^k M_k g_{0k} \bar{\beta}_k^c (KBA_k + KB_{т.з.k} + KB_{б.з} - 1). \quad (13)$$

Период удвоения определяется как

$$T_2 = \frac{G_{\text{ц}}}{M}, \quad (14)$$

где

$$M = M_{\text{Pu}} f.$$

Таким образом, примененный при выводе выражения (14) общий подход позволяет анализировать многие случаи (например, исключение из схем топливного цикла отдельных блоков, одиночно работающий реактор и др.).

Для исследования топливной составляющей взята методика ее расчета из работы [2]. Величину средних выгораний, количеств плутония в активной зоне и экранах, значения ΔT и т. п. определяли из выражений (1–6). Представленная методика расчета T_2 и Z_T была оформлена в виде дополнительного блока к программе 18-4-RZ-15 [4].

Результаты оптимизационных исследований

Исследовались двухзонные большие быстрые реакторы-размножители, профилированные обогащением горючего или составом. Всегда выполняются следующие условия и ограничения: мощность равна 1500 Мвт (эл.); средняя теплонапряженность 400–500 кет/л; объем активной зоны 7,6–9,5 м³; уплотнение 0,3; относительный радиус внутренней зоны 0,75; отношение зонных обогащений горючего $\rho_2/\rho_1 = 1,3 \div 1,5$ и для профилирования составом отношение зонных долей горючего $\frac{e_{r_2}}{e_{r_1}} = 1,0 \div 1,8$; горючее $\text{UO}_2\text{—PuO}_2$ с $\gamma = 8,22 \text{ г/см}^3$ в активной зоне и UO_2 с $\gamma = 9,5 \text{ г/см}^3$ в экранах; максимальная скорость теплоносителя 8 м/сек; максимальная температура центра твэла и стальной оболочки 2500 и 720° С; минимальное отношение шага решетки твэлов к их диаметру 1,1; продолжительность непрерывной работы между перегрузками ограничивается заданным максимальным выгоранием горючего ($\beta_{\text{зад}}^{\text{макс}} = 10\%$) или потерями реактивности ($\frac{|\Delta k_{\text{эф}}|}{k_{\text{эф}}} = 2\%$). Внешняя зона разбивалась дополнительно на три равные по объему подзоны. Для всех четырех зон перегрузки определена своя оптимальная кратность.

В основу сравнения эффективности различных способов перегрузки положены условия равенства и постоянства обеспечиваемых ими временных интервалов непрерывной работы реактора на мощности. Такой критерий позво-

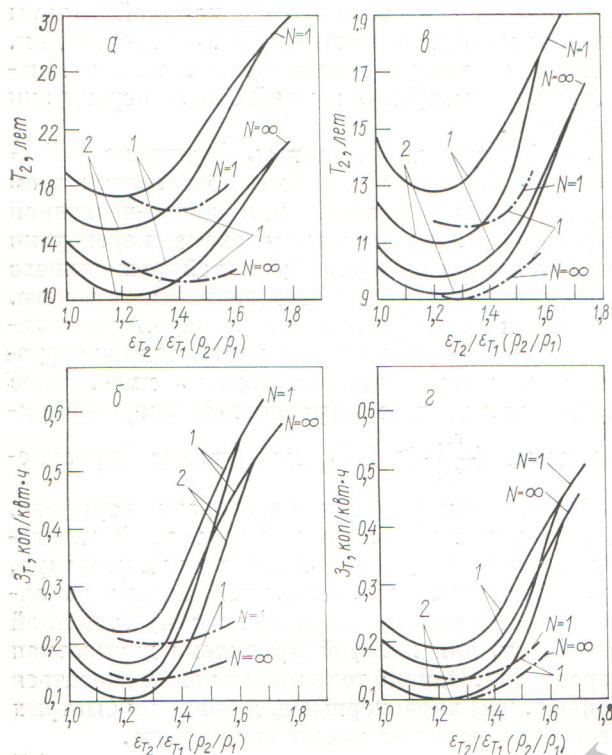
лит нивелировать влияние необходимой системы регулирования на физические характеристики. Дополнительно условие постоянства ΔT исключает из рассмотрения зонный способ перегрузки горючего.

Профилирование составом. Величина $\Delta T = 0,7\text{—}1,0$ года может быть обеспечена в этом случае только разовой или зонно-частичной перегрузкой. Оптимальная схема перегрузки является прежде всего функцией радиального распределения энергонапряженности горючего. Если для непрофилированного реактора оптимальной оказывается зонно-частичная перегрузка, при которой каждая подзона имеет свою кратность, то для выравненной энергонапряженности ($\frac{e_{r_2}}{e_{r_1}} \geq 1,5$) единственно приемле-

мой является разовая перегрузка горючего. Теоретически и в случае выравненной энергонапряженности (это характерно и для реактора, профилированного обогащением) можно дополнительно выделить внешнюю подзону толщиной 10–13 см, для которой приемлема двукратная перегрузка. Однако толщина ее может оказаться меньше, чем характерные для больших быстрых реакторов размеры кассет «под ключ».

Таким образом, для принятого значения ΔT оптимизация проводится только способом зонно-частичной перегрузки. Выигрыши в величине T_2 при переходе к соответствующей оптимальной схеме для случая одного ($N = 1$) или большого числа совместно работающих реакторов ($N = \infty$) представлены на рисунке (а).

Введение для наиболее напряженной зоны кратности $N_1 > 1$ сокращает возможный интервал ΔT до значений $\leq 0,5$ года, однако позволяет добиться дополнительного уменьшения величины T_2 . В этом случае, как правило, оптимальной также оказывается зонно-частичная перегрузка, так как целесообразность применения равномерно-частичной перегрузки ограничивается случаями выравненной энергонапряженности. На рисунке (б) представлены эффективности равномерно-частичной и оптимальной зонно-частичной (при кратности для отдельных подзон $N_1 : N_2 : N_3 : N_4 = 2 : 3 : 3 : 4$) перегрузок. Сопоставление данных рисунка (а и б) позволяет проследить переход от разовой перегрузки к равномерно-частичной с $N_1 = 2$ и затем к оптимальной зонно-частичной. Для наиболее интересной области $\frac{e_{r_2}}{e_{r_1}} = 1,1 \div 1,3$ (область минимальных значений T_2) величины относительных выигрышей



Оптимизация T_2 (а, б) и Z_T (в, г) при разовой и равномерно-частичной (1) и зонно-частичной (2) перегрузках наиболее теплонапряженной зоны.

— профилирование составом; — — — профилирование обогащением горючего.

$\frac{\Delta T_2}{T_2} \cdot 100\%$ при переходе к различным схемам частичной перегрузки приведены в табл. 2. Более значительный выигрыш при применении частичных перегрузок горючего обеспечивает величина топливной составляющей расчетных затрат*. На рисунке (в и г) представлены результаты расчетов абсолютных значений Z_T для обсужденных выше различных способов перегрузки горючего. Табл. 3 содержит данные по величине относительного выигрыша $\frac{\Delta Z_T}{Z_T} \cdot 100\%$ для области $\frac{\varepsilon_{T_2}}{\varepsilon_{T_1}} = 1,1 \div 1,3$.

Профилирование обогащением горючего. Данные рисунка, табл. 2 и 3 характерны для области минимальных значений T_2 и Z_T . Хорошее выравнивание энергонапряженности горючего позволяет применять в этом случае перегрузки разовую (при $KVA = 1$ и $\Delta T = 0,7 \div$

* Величины стоимостных показателей взяты из работы [5].

Относительный выигрыш в величине T_2 ($\frac{\Delta T_2}{T_2} \cdot 100\%$) при переходе к различным схемам частичной перегрузки горючего Таблица 2

Число реакторов	Тип профилирования	Переход		
		от разовой к зонно-частичной	от разовой к равномерно-частичной	от равномерно-частичной к зонно-частичной
Одиночный реактор Система реакторов	Обогащение Состав	—	30—32	—
	Обогащение Состав	12—15	25—28	9—11
		8—10	18—20	—
			12—13	5—7

$\div 1,0$ года) и равномерно-частичную (при $KVA < 1$ и $\Delta T \leq 0,5$ года).

Данные табл. 2 и 3 показывают, что с наибольшей эффективностью метод частичных перегрузок может быть применен для оптимизации величин T_2 и Z_T в реакторах, профилированных составом горючего. Разработка оптимального способа перегрузки позволит для этих реакторов на начальном этапе развития ядерной энергетики ($N < 5$) достигнуть меньших (на 5—10%) величин T_2 и Z_T в сравнении с реакторами, профилированными обогащением горючего; при большом числе совместно работающих реакторов ($N \geq 5$) сделать оба способа профилирования приблизительно равноэффективными.

Таким образом, оптимальная политика частичной перегрузки горючего для больших быстрых реакторов является средством заметного улучшения их комплексных характеристик, таких, как период удвоения и топливная составляющая расчетных затрат. Отметим, что оптимальная политика перегрузок зависит от вида оптимизируемого функционала (T_2 , Z_T ; суммарные приведенные затраты и др.) и не

Относительный выигрыш в величине Z_T ($\frac{\Delta Z_T}{Z_T} \cdot 100\%$) при переходе к различным схемам частичной перегрузки горючего Таблица 3

Число реакторов	Тип профилирования	Переход		
		от разовой к зонно-частичной	от разовой к равномерно-частичной	от равномерно-частичной к зонно-частичной
Одиночный реактор Система реакторов	Обогащение Состав	—	25—27	—
	Обогащение Состав	30—32	22—24	30—32
		—	18—20	—
		35—38	10—12	35—38

является абсолютной. Исследования показали, что окончательные выводы о возможностях каждого класса быстрых реакторов могут быть сделаны только после разработки для них оптимальной схемы перегрузки. Такой вывод подтверждается в работе выполненными сравнениями реакторов, профилированных обогащением горючего и составом. Показано, что выбор оптимальной политики перегрузки горючего особенно важен при профилировании реактора составом, так как позволяет во многих случаях значительно повысить конкурентоспособность таких реакторов.

Поступила в Редакцию 7/VII 1973 г.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Митенков Ф. И. и др. «Атомная энергия», 1971, т. 30, вып. 2, с. 191.
2. Лыткин В. Б., Троянов М. Ф., Новожилов А. И. «Атомная энергия», 1966, т. 21, вып. 5, с. 360.
3. Yoshida H., Hirata M. Proc. of Intern. Conf. at the Institution of Cifil Engineers. London, BNES, 24—26 June 1969, P.2.6, p. 257.
4. Кузьмин А. М., Хромов В. В. В сб.: Инженерно-физические вопросы ядерных реакторов. М., Атомиздат, 1966, с. 33.
5. Хормейстер А., Хаузер Г., Смит Б. «Атомная техника за рубежом», 1971, № 1, с. 14.

К СВЕДЕНИЮ АВТОРОВ

Авторы, направляющие свои рукописи в журнал «Атомная энергия», должны руководствоваться следующими требованиями.

1. Тексты и иллюстративные материалы представляются в четырех экземплярах и окончательно отработанном для печати виде.

Содержание статьи должно быть изложено с предельной ясностью и краткостью. Следует избегать повторения данных таблиц и графиков, а также представления численных результатов в виде таблиц и графиков одновременно.

2. Объем обзорных статей, как правило, не должен превышать 20—22 стр., оригинальных статей — 10—12 стр., аннотаций депонированных статей — 2 стр., писем в редакцию — 5 стр. машинописного текста (включая рисунки с подписями, таблицы и библиографию).

3. К статьям и письмам в редакцию должны быть приложены рефераты, составленные по правилам реферативных журналов, с четко сформулированной целью и результатами работы.

4. Статьи и рисунки должны быть подписаны всеми авторами. Необходимо указать точный адрес, номер телефона, фамилию, полное имя и отчество авторов.

5. Названия всех работ, присылаемых в редакцию, должны быть переведены на английский язык, фамилии и инициалы авторов даны в английской транскрипции. Кроме того, рефераты к статьям должны быть переведены на английский язык в строгом соответствии с русским рефератом.

6. Цитируемая литература приводится в конце работы общим списком с указанием:

а) для журнальных статей: фамилий и инициалов авторов, названия статьи, названия журнала, года, номера тома, выпуска и страницы;

б) для книг: фамилий и инициалов авторов, полного названия книги, места издания, издательства и года издания; для иностранных книг указываются также данные русского перевода;

в) для статей в сборниках: фамилий и инициалов авторов статьи, названия статьи, названия сборника, инициалов и фамилии составителя или редактора сборника, части, выпуска, места издания, издательства, года и страницы.

Ссылки на неопубликованные работы не допускаются.

7. Текст рукописей должен быть напечатан на машинке через два интервала по 28 — 29 строк на одной стороне листа с полями не уже 4 см; рукописные вставки не допускаются.

8. Оформление текста (написание формул, выделение греческих и латинских, строчных и прописных букв, сокращение слов и т. д.) производится в соответствии с общими правилами, принятыми для научно-технических. Трудноразличимые в рукописном обозначении буквы и знаки должны быть пояснены на полях.

9. Прилагаемые к тексту таблицы нумеруются по порядку, каждая таблица должна иметь заголовки.

10. Рисунки выполняются черной тушью на бумаге размером 15×20 см; фотографии должны иметь контрастные изображения, размер фотографии 12×18 см.

11. Подписи к рисункам прилагаются на отдельном листе. В тексте должны быть ссылки на рисунки.

12. Редакция посылает автору только одну корректуру, которую необходимо вернуть в предельно короткий срок.

Рукописи, несоответствующие этим требованиям, не рассматриваются. Отклоненные статьи не возвращаются.