

# ПИСЬМА В РЕДАКЦИЮ

УДК 621.039.566:621.039.517

## Оптимизация энергораспределения реактора ВВЭР-440

ПОБЕДИН В. В., СИМОНОВ В. Д.

Метод минимизации неравномерности энергораспределения реактора [1] использован для оптимизации семи последовательных топливных загрузок ВВЭР-440. Состав первой загрузки и расположение органов регулирования

принимались по данным работы [2]. По завершении очередной кампании наиболее выгоревшие кассеты удалялись и реактор подпитывался свежим топливом обогащением 2,4 и 3,6 %.

Таблица 1

Выгорание топливных загрузок

Характеристика	Номер кампании						
	1	2	3	4	5	6	7
Кампания, эф. сут	$\frac{349}{349}$	$\frac{287}{287}$	$\frac{299}{301}$	$\frac{296}{292}$	$\frac{299}{287}$	$\frac{296}{299}$	$\frac{299}{285}$
Среднее накопление шлаков в выгружаемом топливе, кг/т U:							
обогащение 2,4%	$\frac{14,39}{11,12}$	$\frac{22,68}{22,53}$	$\frac{22,32}{22,76}$	$\frac{25,05}{28,25}$	$\frac{23,05}{26,84}$	$\frac{24,47}{28,29}$	$\frac{24,46}{26,71}$
обогащение 3,6%	—	—	$\frac{31,77}{31,43}$	$\frac{31,70}{30,49}$	$\frac{31,85}{30,20}$	$\frac{31,79}{30,39}$	$\frac{31,87}{30,18}$
Среднее накопление шлаков в топливе реактора, кг/т U:							
обогащение 2,4%	$\frac{13,26}{13,23}$	$\frac{12,76}{13,24}$	$\frac{15,18}{15,76}$	$\frac{13,50}{15,28}$	$\frac{14,25}{15,51}$	$\frac{13,65}{15,40}$	$\frac{14,18}{15,47}$
обогащение 3,6%	$\frac{10,18}{10,33}$	$\frac{15,60}{15,64}$	$\frac{15,33}{14,74}$	$\frac{15,62}{14,59}$	$\frac{15,52}{14,22}$	$\frac{15,93}{14,68}$	$\frac{15,51}{14,62}$

Примечания. Здесь и в табл. 2: 1) числитель — оптимизированные загрузки, знаменатель — сформированные согласно схеме работы [5]; 2) после первой кампании выгружается все топливо обогащением 1,6%; 3) состав топлива подпитки в установленном режиме таков: 36 и 84 кассеты после нечетных кампаний, 31 и 84 кассеты после четных кампаний при обогащении 2,4 и 3,6% соответственно.

Таблица 2

Коэффициент неравномерности энергораспределения

Характеристика	Номер кампании						
	1	2	3	4	5	6	7
Коэффициент неравномерности $K_r$ :							
в начале кампании	$\frac{1,238}{1,314}$	$\frac{1,236}{1,281}$	$\frac{1,249}{1,318}$	$\frac{1,245}{1,314}$	$\frac{1,211}{1,298}$	$\frac{1,255}{1,317}$	$\frac{1,256}{1,293}$
максимальный	$\frac{1,270}{1,314}$	$\frac{1,25}{1,289}$	$\frac{1,265}{1,325}$	$\frac{1,256}{1,314}$	$\frac{1,283}{1,307}$	$\frac{1,261}{1,319}$	$\frac{1,260}{1,301}$
Момент достижения максимума $K_r$ , эф. сут	$\frac{40}{0}$	$\frac{287}{20}$	$\frac{299}{20}$	$\frac{296}{0}$	$\frac{299}{20}$	$\frac{20}{20}$	$\frac{20}{20}$
Коэффициент неравномерности $K_p$ :							
в начале кампании	$\frac{1,867}{1,992}$	$\frac{1,663}{1,673}$	$\frac{1,695}{1,682}$	$\frac{1,752}{1,815}$	$\frac{1,626}{1,699}$	$\frac{1,706}{1,820}$	$\frac{1,649}{1,690}$
максимальный	$\frac{1,905}{1,992}$	$\frac{1,663}{1,725}$	$\frac{1,695}{1,682}$	$\frac{1,793}{1,815}$	$\frac{1,646}{1,721}$	$\frac{1,706}{1,844}$	$\frac{1,649}{1,723}$
Момент достижения максимума $K_p$ , эф. сут	$\frac{20}{0}$	$\frac{0}{287}$	$\frac{0}{0}$	$\frac{296}{0}$	$\frac{299}{287}$	$\frac{0}{299}$	$\frac{0}{285}$

Оптимальные компоновки топлива, соответствующие минимуму коэффициента неравномерности радиального энергораспределения  $K_r$ , определены для начального момента каждой кампании с сохранением 30°-ной симметрии активной зоны. Рабочая группа регулирующих кассет находилась при этом в положении 175 см, поскольку для рассматриваемых активных зон, согласно расчетам, такому исходному положению соответствует наименьшая неравномерность энергораспределения в рабочем диапазоне перемещения кассет СУЗ [3].

Полученные с помощью трехмерной программы БИПР [4] данные о глубине выгорания топлива и продолжительности последовательных кампаний реактора с минимизированным  $K_r$  приведены в табл. 1, а радиальный и объемный коэффициенты неравномерности энергораспределения реактора — в табл. 2. Радиальный коэффициент неравномерности на начало каждой из семи кампаний реактора оказывается в диапазоне значений 1,211—1,256, объемный — 1,626—1,867. Максимальные за время выгорания значения этих коэффициентов составляют:  $K_r = 1,283$ ;  $K_p = 1,905$ .

По программе БИПР также выполнены расчеты для схемы перестановки кассет при перегрузках, предложенной в работе [5] (см. табл. 1 и 2). Начальные значения радиального и объемного коэффициентов неравномерности в этом случае составляют 1,281—1,318 и 1,673—1,992 соответственно. Максимальные значения 1,325 и 1,992.

При сопоставлении данных двух серий расчетов установлено, что в результате оптимизации в рассмотренных топливных загрузках по сравнению с данными работы [5] достигается снижение на 2,6—6,7 % начальных и на 1,8—4,5 % максимальных за время выгорания значений коэффициента неравномерности энергораспределения. Наряду с этим на 4,4 % уменьшается максимальное значение коэффициента объемной неравномерности энергораспределения, увеличивается глубина выгорания топлива обогащением 3,6 % и возрастает примерно на 1 % суммарная за семь кампаний энерговыработка реактора.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Победин В. В., Симонов В. Д. «Атомная энергия», 1979, т. 46, вып. 5, с. 357.
2. Сидоренко В. А. «Атомная энергия», 1977, т. 43, вып. 5, с. 325.
3. Победин В. В., Птицын В. А., Симонов В. Д. В кн.: Проблемы эксплуатации реакторов АЭС. Труды ВТИ, вып. 49. М., изд. ВТИ им. Ф. Э. Дзержинского, 1978, с. 62.
4. Петрунин Д. М., Беляева Е. Д., Киреева И. Л. Препринт ИАЭ-2519. М., 1975.
5. Кохановская Л. В. «Kernenergie», 1977, Bd 20, N 10, S. 307.

Поступило в Редакцию 14.01.80

УДК 621.039.532.21

## Радиационное изменение коэффициента теплового расширения конструкционных графитовых материалов\*

ВИРГИЛЬЕВ Ю. С., НИКИШИНА Л. М., БАЛЯГИНА И. П., ШУРШАКОВА Т. Н.

При эксплуатации уран-графитовых реакторов [1] должна быть обеспечена возможность некоторого перемещения кладки, чтобы предотвратить разрушение вследствие теплового расширения графита [2]. Поэтому изучение

влияния облучения на тепловое расширение графитовых материалов, применяемых в реакторостроении, является весьма актуальной задачей. Для измерения коэффициента теплового расширения (КТР) использовали dilatометр с кварцевой трубкой внутренним диаметром 6,5 мм, которая оканчивается переходной металлической втулкой. Образец диаметром 6 мм или сечением 4 × 4 мм и длиной 40 мм располагался на дне трубки, а его удлинение передавалось с помощью кварцевого толкателя на прикрепленный к переходной втулке индикатор ИЧ (ГОСТ 9696—61) с ценой деления 0,001 мм. Трубку с образцом помещали в электрическую печь с защитной атмосферой или в сосуд Дьюара с жидким азотом. В последнем случае КТР определяли в интервале от -196 до +20°С, что было необходимо во избежание отжига образцов, облученных при низкой температуре. Коэффициент теплового расширения вычисляли по формуле

$$\alpha \cdot 10^{-6} = \Delta L / L \Delta T + 0,54, \quad (1)$$

где  $\Delta L$  — удлинение образца, измеренное индикатором, мм;  $L$  — длина образца, мм;  $\Delta T$  — интервал температуры измерения, град.

Второе слагаемое в формуле (1) учитывает нескомпенсированное удлинение кварцевой трубки вдоль длины образца. Погрешность измерения длины образца составляет  $\pm 0,001$  мм, температуры  $\pm 5^\circ\text{C}$ . Результаты измерения КТР в интервале от -196 до +20°С могут быть пересчитаны [3] для интервала 20—200°С в соответствии с эмпирическим уравнением

$$\alpha_{-196+20} = 0,875\alpha_{20-200} - 0,7 \cdot 10^{-6}. \quad (2)$$

Экспериментальная проверка показала справедливость соотношения (2) для углеродных материалов, облученных

\* В работе принимали участие Р. Н. Иванова и Г. Г. Киреева.

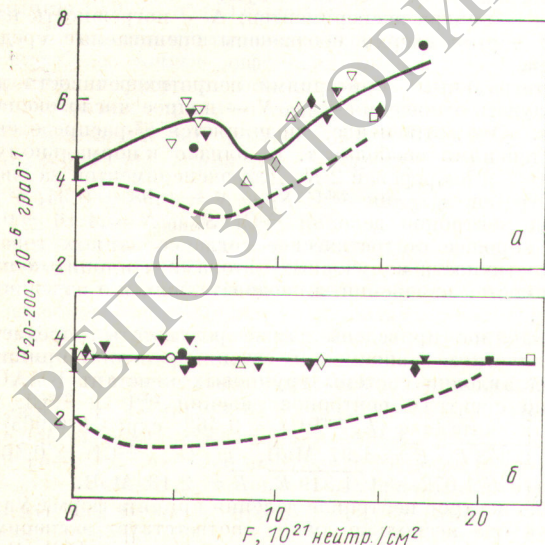


Рис. 1. Зависимость от флюенса нейтронов КТР образцов графита ГМЗ (светлые точки) и его уплотненных вариантов, графитированных при 2300°С (темные точки), а также графита CSF (---) при температуре облучения 130—180 (△, ▲); 450 (▽, ▼); 600 (○, ●); 700—800 (□, ■) и 950°С (◇, ◆). Вырезка образцов перпендикулярно (а) и параллельно (б) оси продавливания