

возможных источниках этих шумов. В пусковых режимах с пониженным давлением в первом контуре (до 5—8 МПа) основным источником является нерастворенный газ в циркулирующем теплоносителе. Интенсивность источника зависит от газосодержания в теплоносителе и давления в первом контуре. При рабочем давлении (~16 МПа) он снижается до 20—30 мкВ. В энергетических режимах преобладающим является внешний по отношению к главному циркуляционному контуру источник, который проявляется когерентно во всех четырех петлях первого контура. Вероятнее всего, он связан с процессами в деаэраторе системы продувки—подпитки. Генерируемый при этом шум по трубопроводам системы проникает в петли ГЦК на участках ГЦН—реактор. Отличительной и благоприятной для решения диагностических задач особенностью фонового шума является его высокая коррелированность. На основе этого эффекта можно реализовать различные алгоритмы фильтрации с доведением остаточного вклада фона до единиц микровольт, что позволит уверенно обнаруживать течи теплоносителя интенсивностью менее 1 л/мин. В настоящее время завершаются работы по оптимизации алгоритма фильтрации, который будет введен в программное обеспечение САКТ для 3-го блока Калининской АЭС и других установок.

Другим очевидным использованием высокой коррелированности акустических шумов является процедура оперативной диагностики состояния измерительных каналов (включая датчики), алгоритм которой также находится в стадии завершения и внедрения на действующих системах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Морозов С.А., Ковтун С.Н., Бударин А.А. и др. Система акустического контроля течей (САКТ): Препринт ФЭИ-3082, 2006.
2. Морозов С.А., Ковтун С.Н., Уралец А.Ю. и др. Пьезоэлектрический преобразователь акустической эмиссии. Патент РФ № 2089897. — Бюл. «Изобретения», 1997, № 25, с. 334.
3. Leighton T. The Acoustic Bubble. London: Academic Press, 1997.
4. Балабудкин М.А., Барам А.А., Коган В.Б. Способ контроля расхода газа. Авт. свид. № 216307. — Бюл. «Изобретения. Промышленные образцы. Товарные знаки», 1968, № 14, с. 104.
5. Гаврилов Л.Р. Содержание свободного газа в жидкостях и методы его измерения. — В сб.: Физические основы ультразвуковой технологии. Под ред. Л.Д. Розенберга. Т. III. М.: Наука, 1970, с. 395—426.
6. Бараненко М.А., Асмолов В.Г., Киров В.С. Термодинамика и теплообмен в ЯЭУ с газонасыщенным теплоносителем. М.: Энергоатомиздат, 1993.

Поступила в Редакцию 31.01.07

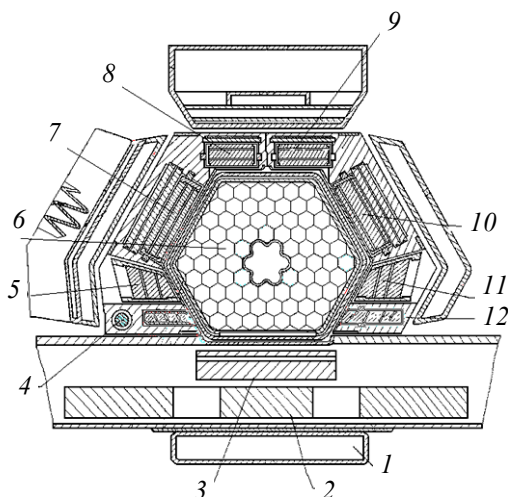
УДК 539.125.5+621.039.519

ИЗМЕРЕНИЕ СРЕДНЕГО ВРЕМЕНИ ЖИЗНИ ПОКОЛЕНИЯ НЕЙТРОНОВ В ИБР-2

Пепельшев Ю.Н. (ОИЯИ), Смирнов В.С. (НИКИЭТ)

Среднее время жизни поколения нейтронов в импульсном реакторе ИБР-2 определяет длительность нейтронной вспышки. Физический пуск показал, что его можно уменьшить с 83 до 50—55 нс и тем самым сократить длительность нейтронной вспышки на 20 мкс [1]. В соответствии с этим в конструкцию реактора были внесены изменения. Так, усилили защиту активной зоны от попадания в нее тепловых и резонансных нейтронов, рассеивающихся в кожухе подчетные оценки времени жизни поколения нейтронов точнее могли быть сопоставлены с экспериментальными. Поэтому возникла необходимость в проведении дополнительных экспериментальных исследований. В настоящей ста-

вижного отражателя и основном замедлителе. Существенно изменили и конструкцию подвижного отражателя (дисковый дополнительный с бериллиевым вкладышем заменили на стальной «трезубец»). Кроме того, для проработки дополнительного пути сокращения нейтронного импульса необходимы более подробные экспериментальные данные о влиянии основных элементов конструкции реактора на среднее время жизни поколения нейтронов. В этом случае расте приведены основные экспериментальные и расчетные результаты времени жизни поколения нейтронов для штатного состояния реактора и реактора со стендом ЭПОС-2, на котором изучали нейтронно-физические характеристики раз-



Р и с. 1. Горизонтальный разрез ИБР-2: 1 — замедлитель за модулятором реактивности; 2, 3 — дополнительный и основной подвижный отражатель соответственно; 4 — стержень автоматического регулятора; 5, 11 — блок быстрой аварийной защиты; 6 — активная зона; 7 — блок компенсирующего отражателя; 8, 9 — блок медленной аварийной защиты 2 и 1 соответственно; 10 — блок компенсирующего отражателя; 12 — блок промежуточного регулятора

личных вариантов подвижных отражателей гетерогенной структуры [2].

ИБР-2 с февраля 1984 г. работает на частоте импульсов 5 Гц при номинальной средней мощности 2 МВт [3] (рис. 1). Активная зона объемом 22 л имеет форму неправильной шестигранной призмы, охлаждается жидким натрием с расходом 80—100 м³/ч. В качестве топлива используется диоксид плутония, заключенный в стальные оболочки стержневой конструкции. Возле одной из граней активной зоны проходят две вращающиеся на одной оси, но с разной скоростью лопасти основного и дополнительного подвижных отражателей модулятора реактивности. К пяти остальным граням примыкают стационарные отражатели, перемещаемые блоки которых являются рабочими органами системы управления и защиты реактора. К стационарным отражателям и кожуху подвижных отражателей примыкают замедлители нейтронов.

Методика измерений. В качестве основного был выбран метод измерения α -Росси, согласно которому для критического нулевой мощности или подкритического состояния реактора вероятность связанных по цепочке отсчетов детектора $P(t)\Delta t$ в момент времени t в интервале Δt при условии регистрации нейтрона в момент времени $t = 0$ [4]

$$P(t)\Delta t = A\Delta t + B \exp(-\alpha t)\Delta t,$$

где A, B — константы, зависящие от ядерно-физических параметров активной зоны и условий измерений; $\alpha = (1 - k_p)/\tau$ — константа спада мгновенных нейтронов (декремент затухания); k_p — коэффициент размножения мгновенных нейтронов. Декремент затухания можно определить по формуле

$$\alpha = \alpha_c (1 - \rho/\beta_{\text{эф}}), \quad (1)$$

где $\alpha_c = \beta_{\text{эф}}/\tau$ — декремент затухания в состоянии запаздывающей критичности; $\rho = (k - 1)/k$ — реактивность; k — коэффициент размножения; $\beta_{\text{эф}}$ — эффективная доля запаздывающих нейтронов. Подкритичность изменяли от $-1\%k$ до $-0,1\%k$. В каждом состоянии реактора декремент затухания измеряли не менее чем для трех различных уровней подкритичности. Незначительное изменение положения органов регулирования, необходимое для задания нужной подкритичности, не влияло на чувствительность детектора и время жизни поколения нейтронов. Для измерения использовали временной анализатор с 1024 каналами шириной 0,5 мкс. «Мертвое» время измерительного тракта не превышало 2 мкс. В качестве детектора нейтронов использовали ионизационную камеру деления с ²³⁵U чувствительностью 10^{-5} имп./дел. Камера была установлена в центре активной зоны. Декремент затухания $\alpha(\Delta k/k)$, полученный при обработке методом α -Росси распределения одной экспонентой, аппроксимировали затем зависимостью (1). Конечным результатом обработки являлись два параметра: α_c — декремент затухания в состоянии критичности ($k = 1$) и ρ^* — реактивность при экстраполяции по уравнению (1) в точку с $\alpha = 0$. Для экстраполированного реактивности состояние реактора соответствует мгновенной критичности и ρ^* есть доля запаздывающих нейтронов $\rho^* = \beta_{\text{эф}}^*$. В дальнейшем для удобства изложения величина $\beta_{\text{эф}}^*$ означает долю запаздывающих нейтронов, полученную при обработке экспериментальных данных. Если погрешность в определении шкалы реактивности мала и ею в измерениях можно пренебречь, экстраполированное значение реактивности в пределах ошибки эксперимента должно совпадать с расчетным $\beta_{\text{эф}}^* = \beta_{\text{эф}}$.

Дополнительно при анализе измерений методом α -Росси использовали подход, в котором реактивность в явном виде отсутствует. Как из-

вестно, величину $\beta_{эф}/\tau$ можно определить по выражению

$$\beta_{эф}/\tau = \frac{\alpha_2 - \alpha_1 X}{(1 - X)} \pm \Delta(\beta_{эф}/\tau),$$

где α_1, α_2 — константы спада цепочки мгновенных нейтронов, измеренные для двух уровней подкритичности; $X = N_1/N_2$ — отношение скоростей счета детектора, соответствующее этим уровням:

$$\Delta(\beta_{эф}/\tau) = \left[X^2 \Delta\alpha_1^2 + \Delta\alpha_2^2 + \frac{\alpha_2 - \alpha_1}{(1 - X)^2} \Delta X^2 \right];$$

$$\Delta X^2 = X^2 \left[\frac{1}{N_1} + \frac{1}{N_2} \right].$$

Оценка была получена для двух состояний реактора: $(\beta_{эф}/\tau)_{ш} = (3,65 \pm 0,2)10^4 \text{ с}^{-1}$, $\tau = 59 \pm 3 \text{ нс}$ для штатного (без воды в кожухе подвижного отражателя и замедлителей) и $(\beta_{эф}/\tau)_с = (4,71 \pm 0,1)10^4 \text{ с}^{-1}$, $\tau = 46 \pm 2 \text{ нс}$ со стендом ЭПОС-2. Полученные результаты согласуются с данными основной обработки измерений методом α -Росси: $\beta_{эф}/\tau_{ш} = (3,55 \pm 0,12)10^4 \text{ с}^{-1}$ и $\beta_{эф}/\tau_с = (4,7 \pm 0,09)10^4 \text{ с}^{-1}$ соответственно.

Дополнительно для штатного состояния реактора была получена оценка времени жизни поколения пульса мощности

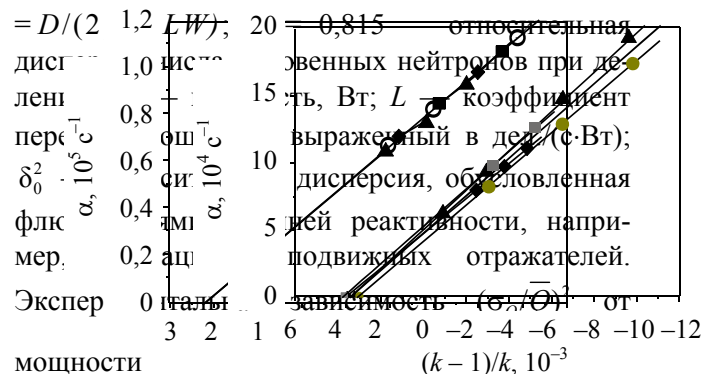
Таблица 1. Декремент затухания α_c и время жизни мгновенных нейтронов $\tau = \beta_{эф}/\alpha_c$ в различных вариантах окружения активной зоны ИБР-2 в эксперименте методом α -Росси

Основные замедлители	Замедлитель за подвижным отражателем	Вода в кожухе подвижного отражателя	Вариант подвижного отражателя	$\alpha_c, 10^4 \text{ с}^{-1}$	$\tau, \text{ нс}$
—*	—	—	Штатный	$3,55 \pm 0,12$	61 ± 2
+	—	—	— « —	$3,36 \pm 0,15$	64 ± 3
—	—	+	— « —	$3,74 \pm 0,19$	$58 \pm 3^{**}$
+	—	+	— « —	$3,57 \pm 0,15$	61 ± 3
			— « —	$3,48 \pm 0,01$	$62 \pm 2^{***}$
			ЭПОС-2:		
	—	—	сталь—бериллий	$4,62 \pm 0,21$	47 ± 2
+	+	—	— » —	$4,10 \pm 0,2$	53 ± 3
+	—	—	сталь—сталь	$4,70 \pm 0,9$	46 ± 1

*+, — — наличие и отсутствие элементов конструкции соответственно.

**Получено по двум точкам. Оценка недостаточно надежна.

***Усреднение по всем состояниям замедлителей.



Р и с. 2. Зависимость декремента затухания от реактивности и линейная экстраполяция в точку с $\alpha = 0$ в эксперименте на стенде ЭПОС-2 при наличии (●) и отсутствии (◆) кожухе подзамедлителя за подвижным отражателем (основной подчии воды в подвижный отражатель — сталь, дополнительный — бериллий), основном и дополнительном подвижных отражателях из стали в различающейся геометрии (▲, ■) при наличии (▲, ■) и отсутствии (◆, ●) воды в кожухе подзамедлителя.

Как видно из приведенных данных, дополнительные методы измерения и обработки согласуются с результатами основного метода α -Росси.

Экспериментальные результаты. В штатном варианте реактора все измерения проводили при отсутствии замедлителя за подвижным отражателем, в то время как другие замедлители были установлены. Во всех экспериментах для всех комбинаций слива воды из замедлителей не получено ни одного статистически значимого результата, который бы указывал на отклонение экспериментальных данных от одноточечного

Т а б л и ц а 2. Расчетное влияние окружения активной зоны на время жизни поколения нейтронов τ для штатного варианта реактора

Основные замедлители	Замедлитель за подвижным отражателем	Основная радиационная защита	Радиационная защита за подвижным отражателем	Подвижный отражатель	τ , нс
+	+	+	+	+	66 ± 7
+	+	+	—	+	65 ± 6
+	—	+	—	+	58 ± 6
+	+	—	—	+	62 ± 6
+	—	+	—	—	51 ± 5
—	—	—	—	—	$22 \pm 2^*$

*Учитывали только ТВС и корпус реактора.

Т а б л и ц а 3. Расчетное влияние отдельных элементов конструкции подвижного отражателя на время жизни поколения нейтронов τ для стенда ЭПОС-2

Замедлитель за подвижным отражателем	Вода в кожухе подвижного отражателя	Кожух подвижного отражателя	Подвижный отражатель	τ , нс
—	+	—	—	55 ± 6
—	—	—	+	54 ± 6
—	+	—	+	60 ± 6
+	—	—	+	65 ± 5
+	+	—	+	$60,5 \pm 5$
+	+	+	+	$67,5 \pm 5$
—	—	—	—	$50^* \pm 5$

*Без учета основной радиационной защиты.

Т а б л и ц а 4. Вклад отдельных элементов конструкции реактора в полное время жизни поколения нейтронов, нс

Элемент конструкции реактора	Эксперимент	Расчет
Основные замедлители	0 ± 3	
Замедлитель за подвижным отражателем	7 ± 4	7 ± 8
Натрий в активной зоне	5 ± 2	
Замена стального дополнительного подвижного отражателя на бериллиевый	1 ± 2	
Замена штатного подвижного отражателя макетом без кожуха и защиты	-15 ± 5	-8 ± 9
Радиационная защита за подвижным отражателем		1 ± 9
Основная биологическая защита		4 ± 8
Компенсирующие регуляторы		7 ± 5
Подвижные отражатели		7 ± 8
Медленная аварийная защита		3 ± 5
Быстрая аварийная защита + промежуточный регулятор + автоматический регулятор		4 ± 5

стендом ЭПОС-2. Поскольку в любых измерениях время жизни фактически определяет лишь отношение $\beta_{\text{эф}}/\tau$, а расхождение в экстраполированных оценках реактивности $\beta_{\text{эф}}^*$ для штатного варианта реактора и вариантов ЭПОС-2 велико, рассмотрим последнее обстоятельство более подробно. Причиной значительного расхождения между экспериментальной $\beta_{\text{эф}}^*$ и расчетной реактивностью $\beta_{\text{эф}}$ может быть следующее: реактивность при измерениях со стендом ЭПОС-2 определена с большой систематической погрешностью, но $\beta_{\text{эф}}$ по отношению к штатному варианту реактора не изменилось (в этом случае для времени жизни справедлива оценка, приведенная в табл. 1). Если погрешность в определении шкалы реактивности мала, то, как это ни парадоксально, $\beta_{\text{эф}}$ при удалении части радиационной защиты со стороны подвижного отражателя и кожуха подвижного отражателя увеличивается в 1,45—1,62 раза. В соответствующее число раз возрастает и время жизни. Здесь необходимо отметить, что расчетная доля запаздывающих нейтронов для штатного состояния реактора и в варианте со стендом совпадает, поскольку активная зона не менялась, а влияние стенда на форму спектра нейтронов в зоне было незначительным. Во втором случае необходимо предположить наличие дополнительной группы запаздывающих нейтронов

$$\beta_k = \bar{\beta}_{\text{эф}}^* - \beta_{\text{эф}} = (1,21 \pm 0,11)10^{-3},$$

где $\bar{\beta}_{\text{эф}}^* = \sum \beta_i^* \sigma_i^{-2} / \sum \sigma_i^{-2} = (3,38 \pm 0,11)10^{-3}$ — средневзвешенное по всем измерениям на стенде ЭПОС-2 $\beta_{\text{эф}}^*$. Присутствие дополнительной группы запаздывающих нейтронов, рассеянных на замедлителях и первом слое бетонной защиты, было показано в работе [6]. Доля этой группы была оценена $\sim 0,1\beta_{\text{эф}}$. Эти нейтроны должны влиять на экспериментальные результаты во всех импульсных измерениях, в том числе и методом α -Росси. Следовательно, на стенде должна присутствовать по меньшей мере еще одна группа нейтронов с эффективной долей $0,4\beta_{\text{эф}}$ ($\beta_k - 0,1\beta_{\text{эф}}$). Источником этой группы, вероятнее всего, могло быть обратное рассеяние на элементах конструкции, расположенных в помещении за стендом, т.е. за удаленной частью радиационной защиты. Выделить статистически

достоверную вторую экспоненту, характерную для нейтронов альbedo, в данных измерениях было невозможно. Если все же принять, что дополнительные нейтроны альbedo существуют, но находятся вне экспериментально наблюдаемого временного диапазона 150 мкс, то для константы спада и средней энергии нейтронов альbedo следует ограничение: константа спада должна быть менее $6,66 \cdot 10^{-3} \text{ с}^{-1}$ и энергия менее 8,3 эВ. Расстояние от активной зоны до возможного источника группы рассеянных нейтронов равно 6 м. Расчетные оценки доли нейтронов альbedo для геометрии стенда ЭПОС-2 показали, что эффективное значение β_k не превышает 10^{-5} , верхнее значение энергии нейтронов альbedo 3 МэВ, т.е. значительно отличаются от соответствующих оценок в измерениях методом α -Росси. Поэтому предположение о наличии большой группы дополнительных нейтронов альbedo маловероятно.

Предположение о систематической погрешности в определении шкалы реактивности также маловероятно по следующим причинам. Действительно, калибровку регуляторов реактивности со стендом ЭПОС-2 не проводили, а использовали данные, полученные в штатном состоянии реактора. Изменение шкалы реактивности могло произойти, если бы эффективность регуляторов при удалении штатного подвижного отражателя с частью радиационной защиты изменилась. Позднее на стенде ЭПОС-3 было отмечено, что при перемещении штатного подвижного отражателя на 1 м от активной зоны эффективность регуляторов не изменялась. Дополнительные расчеты также показывали, что при полном удалении подвижного отражателя с защитой эффективность регуляторов не должна была измениться более чем на 10%.

Таким образом, расчетные и экспериментальные данные не позволяют надежно объяснить расхождение между $\beta_{\text{эф}}$ и $\beta_{\text{эф}}^*$ присутствием дополнительной группы запаздывающих нейтронов или ошибкой в методике измерения реактивности. Здесь необходимо отметить, что в некоторых экспериментах на быстрых сборках с урановой зоной, например, на английской сборке «Vera» и шведской FR-0 [7] экстраполированная реактивность для состояния мгновенной критичности имела почти такое же отличие от

расчетной оценки $\beta_{\text{эф}}^*/\beta_{\text{эф}} \approx 1,5$, что и в экспериментах на стенде ЭПОС-2.

Основные выводы. В штатном варианте реактора время жизни поколения нейтронов $\tau = 62 \pm 2$ нс. Замедлители, окружающие активную зону, кроме замедлителя за подвижным отражателем, почти не влияют на него. Уменьшение времени жизни по сравнению с данными физического пуска (83 нс) связано с усилением защиты активной зоны от нейтронов, рассеянных на основных замедлителях и кожухе подвижного отражателя. Сокращение длительности нейтронной вспышки только за счет уменьшения времени жизни составило $\sim 10\%$, т.е. ~ 22 мкс. Наибольшее влияние на время жизни поколения нейтронов оказывают конструктивные элементы модулятора реактивности (кожух подвижного отражателя и часть радиационной защиты). При отсутствии этих элементов время жизни нейтронов в реакторе может быть уменьшено до 47 ± 6 нс. Длительность нейтронной вспышки соответственно сократится на 21 мкс. В экспериментах со стендом ЭПОС-2 при отодвинутой от активной зоны части радиационной защиты было отмечено значительное расхождение между расчетной долей запаздывающих нейтронов и экстраполированной в состояние мгновенной критичности реактивностью $\beta_{\text{эф}}^*$. Отношение $\beta_{\text{эф}}^*/\beta_{\text{эф}}$ в среднем состави-

ло 1,5. Объяснение такому расхождению не найдено.

В заключение авторы выражают благодарность персоналу ИБР-2 за вывод реактора в нужное состояние и поддержку в проведении многочисленных экспериментов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гусев В.В., Гудовский В.Г., Дмитренко В.В. и др. Физический пуск реактора ИБР-2. Измерение среднего времени жизни поколения нейтронов. Сообщение ОИЯИ, РЗ-12449. Дубна, 1979.
2. Ananiev V.D., Lomidze V.L., Rogov A.D. et al. An optimization study of the reactivity modulator for the periodically pulsed fast reactor. — Atomkernenergie Kerntechnik, 1983, v. 43, № 4, p. 253—259.
3. Ананьев В.Д., Архипов В.А., Бабаев А.И. и др. Энергетический пуск реактора ИБР-2 и первые физические исследования на его пучках. — Атомная энергия, 1984, т. 57, вып. 4, с. 227—234.
4. Orndoff J. Prompt neutron periods of metal critical assemblies. — Nucl. Sci. Engng, 1957, v. 2, p. 450.
5. Шабалин Е.П. Импульсные реакторы на быстрых нейтронах. М.: Атомиздат, 1976.
6. Peryelyshev Yu.N., Popov A.K. Influence of the nearest environment of the core on the power pulse dynamics in the IBR-2 reactor. — An. Nucl. Energy, 2006, v. 33, p. 813—819.
7. Стумбур Э.А. Исследование размножающих сред импульсным нейтронным методом. — В сб.: Импульсные и статистические методы исследования реакторов. Всес. школа физиков. Обнинск, август 1967 г. Обнинск, ФЭИ, 1969, т. 1, с. 227—285.

Поступила в Редакцию 24.10.06

УДК 621.039.548

МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОГО РАСПУХАНИЯ ДИОКСИДА УРАНА И ДЕФОРМАЦИОННОГО ПОВЕДЕНИЯ ТВЭЛА

Гонтарь А.С., Нелидов М.В. (НИИ НПО «Луч»)

Деформация оболочки, вызванная распуханием диоксида урана, является одним из основных факторов, ограничивающих ресурс высокотемпературных ТВЭЛов космических ЯЭУ [1]. Расчетно-теоретические и экспериментальные данные о распухании при высокотемпературном облучении ограничены и противоречивы [2]. По одним данным распухание линейно растет с выгоранием, по другим выходит на насыщение. В одних работах предсказывается наличие максимума в температурной зависимости распухания, в других резкое увеличение распухания с темпе-

ратурой. Причиной таких рассогласований могут быть особенности поведения диоксида урана при высокотемпературном облучении, связанные с миграцией пузырьков газообразных продуктов деления и структурными изменениями. Известные расчетно-теоретические модели не учитывают в полной мере совместное влияние указанных процессов.

Для анализа влияния эксплуатационных параметров на высокотемпературное распухание диоксида урана и поиска путей повышения радиационной стойкости оксидного топлива пред-