

P13-2006-115

Ю. Н. Пепельшев, В. С. Смирнов

ИЗМЕРЕНИЕ СРЕДНЕГО ВРЕМЕНИ ЖИЗНИ
ПОКОЛЕНИЯ НЕЙТРОНОВ В РЕАКТОРЕ **ИБР-2**

Направлено в журнал «Атомная энергия»

Пепельшев Ю. Н., Смирнов В. С.

P13-2006-115

Измерение среднего времени жизни поколения нейтронов в реакторе ИБР-2

Цель работы состояла в измерении времени жизни нейтронов в активной зоне реактора ИБР-2 в зависимости от состояния реактора и окружения активной зоны. Основная задача заключалась в изучении возможности сокращения длительности нейтронного импульса. Использовались различные методы измерения и обработки экспериментальных данных. В качестве основного метода измерения использовался метод Росси- α . Для сравнения с экспериментом время жизни оценивалось расчетным путем. Показано, что все используемые методы измерения дают согласующиеся друг с другом результаты. Для штатного состояния реактора время жизни нейтронов в активной зоне ИБР-2 равно (61 ± 2) нс. Приведены оценки вклада в общее время жизни нейтронов со стороны отдельных элементов активной зоны и ее окружения. Отмечено, что в экспериментах с отодвинутой частью биологической защиты имеются расхождения в оценке эффективной доли запаздывающих нейтронов (или времени жизни) в 1,5 раза по сравнению со штатным состоянием реактора. Объяснения такому расхождению найдено не было.

Работа выполнена в Лаборатории нейтронной физики им. И. М. Франка ОИЯИ.

Препринт Объединенного института ядерных исследований. Дубна, 2006

Pepelyshev Yu. N., Smirnov V. S.

P13-2006-115

Measurement of the Average Lifetime of Generation of Neutrons at the IBR-2 Reactor

The aim of the work was to measure neutron lifetime in the core of the IBR-2 reactor depending on the reactor state and the core surrounding. The main task was to study a possibility to reduce the width of neutron pulse. Various techniques of measuring and processing of the experimental data were used. The Rossi- α method was used as the main method of measurement. In order to compare with the experiment, the lifetime was evaluated by the way of calculation. It was shown that all the used methods of measurement give the results that are in line with one another. For standard state of the reactor the neutron lifetime in the core of IBR-2 is (61 ± 2) ns. The estimations of contribution of separate elements of the core and its surrounding to the total neutron lifetime were presented. It was observed that the experiments, in which a part of the biological shielding was moved away, have discrepancies in the estimation of the effective fraction of delayed neutrons (or the lifetime) by a factor of 1.5 in comparison with the standard state of the reactor. The explanation of this discrepancy is not found yet.

The investigation has been performed at the Frank Laboratory of Neutron Physics, JINR.

Preprint of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna, 2006

ВВЕДЕНИЕ

Во время физического пуска реактора ИБР-2 было показано, что среднее время жизни поколения нейтронов в реакторе (τ) 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. Была, например, усилена защита активной зоны от попадания в нее тепловых и резонансных нейтронов, рассеивающихся в кожухе подвижного отражателя (ПО) и в основном замедлителе. Существенно изменилась и конструкция ПО (дисковый дополнительный отражатель с бериллиевым вкладышем был заменен на стальной «трезубец»). Кроме того, не было экспериментальных данных о влиянии натрия на τ . Таким образом, возникла необходимость в проведении новых экспериментальных исследований по влиянию отдельных элементов конструкции реактора на τ . В работе приведены основные результаты экспериментальных и расчетных исследований τ для штатного состояния реактора и для стенда ЭПОС-2. На стенде ЭПОС-2 исследовались ПО гетерогенной структуры [2].

1. КРАТКОЕ ОПИСАНИЕ КОНСТРУКЦИИ РЕАКТОРА ИБР-2

Импульсный исследовательский реактор периодического действия на быстрых нейтронах ИБР-2 с февраля 1984 г. работает на частоте импульсов 5 Гц при номинальной средней мощности 2 МВт [3]. Схема реактора ИБР-2 показана на рис. 1. Активная зона реактора объемом 22 л имеет форму неправильной шестигранной призмы. В качестве топлива используется диоксид плутония, заключенный в стальные оболочки твэлов стержневой конструкции, собранных в 74 кассеты по 7 штук в каждой. Охлаждение активной зоны осуществляется жидким натрием с расходом 100 м³/ч. Мимо одной из граней активной зоны проходят две вращающиеся на одной оси, но с разной скоростью лопасти — основной и дополнительный подвижные отражатели (ОПО и ДПО) модулятора реактивности (вариант ПО-2: ОПО-лопасть, ДПО-трезубец). К пяти остальным граням примыкают стационарные отражатели, перемещаемые блоки которых являются рабочими органами системы управления и защиты реактора. Компенсирующие органы КО1 и КО2 предназначены для компенсации выгорания плутония ²³⁹Pu и отрицательного эффекта температурной реактивности. Стержень автоматического регулятора АР предна-

значен для поддержания мощности реактора на заданном уровне. Предусмотрен также промежуточный регулятор ПР, которым вручную обеспечивается необходимая компенсация медленных изменений реактивности. В качестве аварийной защиты используются два вольфрамовых блока медленной аварийной защиты МАЗ1, 2 и два вольфрамовых блока быстрой аварийной защиты БАЗ1, 2. Спектр нейтронов в активной зоне близок к спектру деления. В центре активной зоны расположен измерительный канал, в который снизу до середины активной зоны введены ионизационные камеры деления с ^{235}U и ^{238}U . Эффективность камер в среднем составляла 10^{-5} имп./дел.

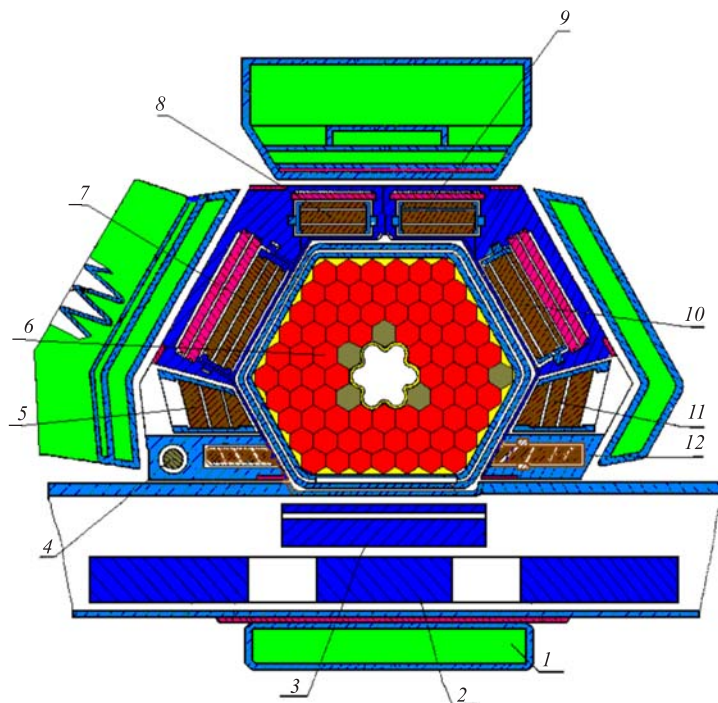


Рис. 1. Вид реактора ИБР-2 в горизонтальном разрезе: 1 — замедлитель за модулятором реактивности; 2 — дополнительный подвижный отражатель ДПО; 3 — основной подвижный отражатель ОПО; 4 — стержень автоматического регулятора АР; 5 — блок быстрой аварийной защиты БАЗ2; 6 — активная зона; 7 — блок компенсирующего отражателя КО2; 8 — блок медленной аварийной защиты МАЗ2; 9 — блок медленной аварийной защиты МАЗ1; 10 — блок компенсирующего отражателя КО1; 11 — блок быстрой аварийной защиты БАЗ1; 12 — блок промежуточного регулятора ПР

2. МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЙ

В качестве основного метода измерений был выбран метод Росси- α . Дополнительно величина τ оценивалась из анализа формы импульса мощности и плотности распределения энергии импульсов мощности. В экспериментах Росси- α использовался временной анализатор с шириной канала Δt , равной 0,5 мкс, и числом каналов 1024. «Мертвое» время всего измерительного тракта не превышало 2 мкс. В качестве детектора нейтронов использовалась ионизационная камера деления с ^{235}U , установленная в центре активной зоны, с чувствительностью 10^{-5} имп./дел.

В рамках одноточечной модели кинетики, справедливость которой для реактора ИБР-2 была показана в работе [1], для критической нулевой мощности или слегка подкритического реактора вероятность связанных по цепочке отсчетов с детектора $P(t)\Delta t$ в момент времени t в интервале Δt при условии регистрации нейтрона в момент времени $t = 0$, согласно [4], равна

$$P(t)\Delta t = A\Delta t + B e^{-\alpha t} \Delta t,$$

где A, B — константы, зависящие от ядерно-физических параметров активной зоны и условий измерений; $\alpha = (\beta_{\text{эфф}} - \rho)/\Lambda = (1 - k_p)/\tau$ — константа спада мгновенных нейтронов (декремент затухания); $\beta_{\text{эфф}} = 2,165 \cdot 10^{-3}$ — эффективная доля запаздывающих нейтронов (расчетное значение); k_p — коэффициент размножения мгновенных нейтронов; $\rho = (K - 1)/K$ — реактивность; K — эффективный коэффициент размножения; Λ — время генерации нейтронов; $\tau = \Lambda \cdot K$ — время жизни нейтронов. Поскольку для критического реактора на запаздывающих нейтронах ($K = 1$) $\Lambda = \tau$, уравнение для α переходит в $\alpha_c = \beta_{\text{эфф}}/\Lambda = \beta_{\text{эфф}}/\tau$, откуда следует

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

Отношение B/A выбиралось исходя из требований статистической точности измерения (1 %) при разумном времени набора статистики (1 ч). Подкритичность определялась по методу «обратного умножения», а эффективный «нулевой» счет — по методу «разгона». Величина ΔK изменялась в пределах от -1 до $-0,1\% K$ ($K = 0,990 - 0,999$), а B/A — от 1,5 до 5. Незначительное изменение в положении органов регулирования, необходимое для задания нужного уровня подкритичности, не влияло на чувствительность детектора и на величину τ . В каждом состоянии реактора значение α измерялось не менее чем для трех различных уровней подкритичности. Зарегистрированные распределения $P(t)\Delta t$ аппроксимировались зависимостью

$$P^*(t)\Delta t = A\Delta t + \sum_{i=1}^n B_i e^{-\alpha_i t} \Delta t, \text{ где } n = 1, 2.$$

Экспериментальные точки $\alpha(\Delta K/K)$, полученные путем аппроксимации Росси- α -распределений одной экспонентой, аппроксимировались затем зависимостью (1), где реактивность выражена в долях $\beta_{эфф}$. Для получения абсолютных значений реактивности использовалось расчетное значение $\beta_{эфф} = 2,165 \cdot 10^{-3}$. Конечным результатом обработки являлись два параметра: α_c — значение α в состоянии критичности ($K = 1$) и ρ^* — значение реактивности при экстраполяции (1) в точку с $\alpha = 0$. Для экстраполированного значения реактивности реактор находится в состоянии мгновенной критичности и ρ^* есть доля запаздывающих нейтронов $\rho^* = \beta_{эфф}^*$. В дальнейшем для удобства изложения величина $\beta_{эфф}^*$ означает долю запаздывающих нейтронов, полученную при обработке экспериментальных данных. Если шкала реактивности определена «правильно», то экстраполированное значение реактивности в пределах ошибки эксперимента должно совпадать с расчетным $\rho^* = \beta_{эфф}^* = \beta_{эфф}$. Указанные выше процедуры обработки проводились независимо с использованием двух программ многопараметрической аппроксимации. Поскольку результаты обработки, хотя и в малой степени, зависят от используемых методов минимизации χ^2 , в конечном результате учитывались особенности применения обеих программ. Средние значения параметров определялись в виде

$$X = \frac{\sum_{i=1}^2 X_i \sigma_{xi}^{-2}}{\sum_{i=1}^2 \sigma_{xi}^{-2}} \pm \left(1 / \sum_{i=1}^2 \sigma_{xi}^{-2} \right)^{1/2},$$

где $X = \alpha_0, \beta_{эфф}^*$; $X_i = \alpha_{0i}, \beta_{эфф,i}^*$,

σ_{xi} — погрешность параметра x ; i — индекс, указывающий на использование той или иной программы. В дальнейшем анализе использовалась оценка $\tau = \beta_{эфф}/\alpha_c$.

3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Ниже представлены результаты измерений в штатном состоянии реактора при небольших изменениях окружения активной зоны и в варианте ЭПОС-2.

3.1. Измерение в штатном состоянии реактора. В штатном варианте реактора все измерения проводились при отсутствии замедлителя за подвижным отражателем, в то время как другие замедлители были установлены. Для всех комбинаций слива воды из замедлителей не было получено ни одного статистически значимого результата, который бы указывал на отклонение экспериментальных данных от одноточечного представления кинетики ИБР-2 (все измеренные распределения содержали только одну экспоненту). Значения α в зависимости от $\Delta K/K$ для штатного варианта реактора приведены на рис. 2. В табл. 1 даны основные результаты измерений величины τ . Как

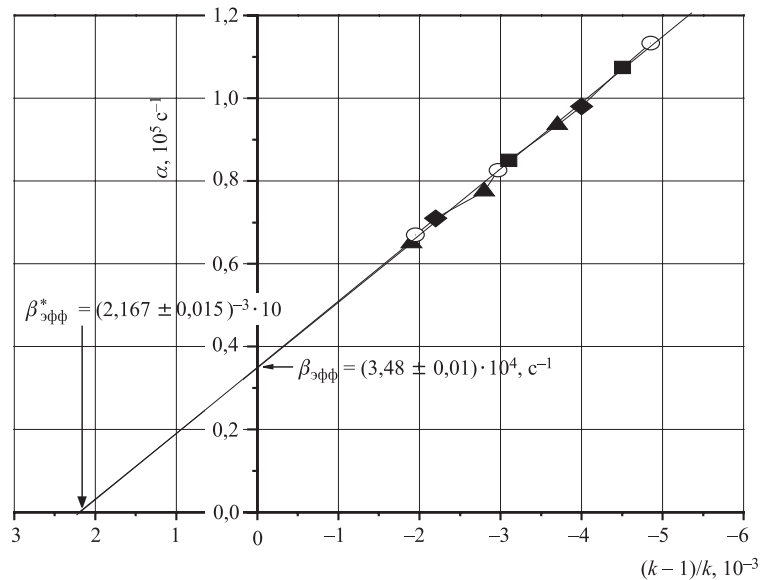


Рис. 2. Зависимость декремента затухания от реактивности и линейная экстраполяция в точку с $\alpha = 0$ (критическое состояние на мгновенных нейтронах). Усреднение по всем состояниям реактора. Экстраполированное значение реактивности $\rho^* = \beta_{\text{эфф}}^* = (2,167 \pm 0,015) \cdot 10^{-3}$. \circ — воды в кожухе ПО и замедлителях нет; \blacktriangle — вода в замедлителях есть, из кожуха ПО слита; \blacklozenge — вода в кожухе ПО есть, в замедлителях нет; \blacksquare — вода в кожухе ПО и замедлителях есть

следует из табл. 1, в штатном варианте реактора значение τ , усредненное по всем состояниям замедлителей, в пределах ошибки совпадает с оценками для отдельных состояний замедлителей. При этом экстраполированное в точку с $\alpha = 0$ значение реактивности $\rho^* = \beta_{\text{эфф}}^* = (2,167 \pm 0,015) \cdot 10^{-3}$ практически равно расчетной доле запаздывающих нейтронов (см. рис. 2).

3.2. Измерение τ в экспериментах ЭПОС-2. В измерениях на стенде ЭПОС-2 часть биологической защиты вместе со штатным модулятором реактивности (МР) была отодвинута от активной зоны, а вместо МР устанавливались различные варианты ОПО–ДПО. Измерения τ проводились для следующих вариантов: (2–2Г)* – (Fe–Be); (2–2Г) + замедлитель за ПО – (Fe–Be); (4–5)*, (5–1), (5–3) – (Fe–Fe). Обозначения вариантов ОПО–ДПО соответствуют обозначениям, принятым в работе [2]. Основные результаты измерений приведены на рис. 3 и в табл. 1. Для экспериментов на ЭПОС-2 различие между $\beta_{\text{эфф}}$ и $\beta_{\text{эфф}}^*$ ($\beta_{\text{эфф}}^*/\beta_{\text{эфф}} = 1,45–1,62$) значительно превышает статистическую погрешность измерения.

Таблица 1. Эксперимент Росси- α . Значение декремента затухания α_c и оценка времени жизни мгновенных нейтронов $\tau = \beta_{эфф}/\alpha_c$ в различных вариантах окружения активной зоны ИБР-2. (Знак «+» означает здесь и далее наличие элементов конструкции, «-» — их отсутствие)

Основные замедлит.	Замедлит. за ПО	H ₂ O в кожухе ПО	Вариант ПО	$\alpha_c, 10^4 \text{ с}^{-1}$	$\tau, \text{нс}$
-	-	-	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
			—”-	$3,48 \pm 0,01$	$61 \pm 2^{**})$
	-	-	ЭПОС-2 Fe-Be (2-2Г)*	$4,62 \pm 0,21$	47 ± 2
	-	-	Fe-Be (2-2Г)	$4,10 \pm 0,20$	53 ± 3
	-	-	Fe-Fe (4-5)	$4,70 \pm 0,9$	46 ± 1
	-	-	Fe-Fe (4-5) (5-1) (5-3)	$4,71 \pm 0,10$	46 ± 1

*) Получено по двум точкам. Оценка недостаточно надежна.
**) Усреднение по всем состояниям замедлителей.

4. РАСЧЕТ. СРАВНЕНИЕ РАСЧЕТНЫХ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ

Для анализа данных в интерпретации Росси- α -экспериментов были проведены расчеты по методу Монте-Карло. Величина τ оценивалась в различных конфигурациях ближайшего окружения активной зоны. В расчетной модели реактора учитывался значительный объем биологической защиты толщиной один метр. Результаты расчета для некоторых состояний реактора приведены в табл. 2 и 3. Основная погрешность расчета была связана с некоторой идеализацией в расчетной модели сложной геометрии стенда ЭПОС-2. Вклад отдельных элементов конструкции реактора в величину τ , полученный на основании экспериментальных и расчетных данных, приведен в табл. 4. В штатном варианте реактора расчетное значение τ (60 нс) практически совпадает с измеренным (62 нс).

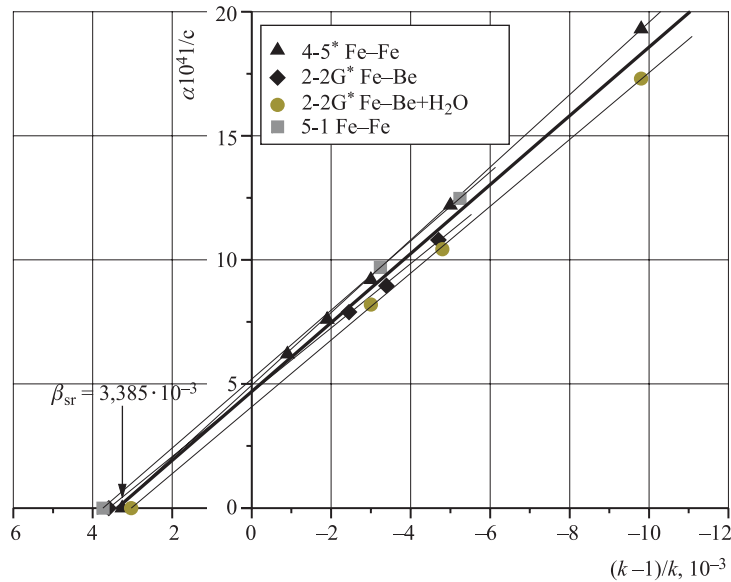


Рис. 3. Эксперимент ЭПОС-2. Зависимость декремента затухания от реактивности и линейная экстраполяция к критическому состоянию на мгновенных нейтронах. Шкала реактивности определена по методу «разгона» в штатном состоянии реактора. Значение $\beta_{\text{эфф}}$ принималось равным расчетному $2,165 \cdot 10^{-3}$. Обозначения исследуемых вариантов отражателей (ОПО–ДПО) представлены на рисунке. Прямые линии — результат аппроксимации экспериментальных точек для отдельных вариантов отражателей. Жирная линия — аппроксимация по всем экспериментальным точкам. Экстраполированное значение реактивности, усредненное по всем состояниям реактора $\beta_{\text{эфф}}^* = (3,38 \pm 0,015) \cdot 10^{-3}$, существенно отличается от расчетного

Таблица 2. Расчет. Штатный вариант реактора. Влияние окружения активной зоны на величину τ

Основные замедлит.	Замедлит. за ПО	Основная биологич. защита	Биологич. защита за ПО	ПО	τ , нс
+	+	+	+	+	66 ± 7
+	+	+	-	+	65 ± 6
+	-	+	-	+	58 ± 6
+	+	-	-	+	62 ± 6
+	-	+	-	-	51 ± 5
-	-	-	-	-	$22 \pm 2^*)$

*) Учитывались только тепловыделяющие кассеты и корпус реактора.

Таблица 3. Расчет. ЭПОС-2. Влияние отдельных элементов конструкции подвижного отражателя (ПО) на величину τ

Замедлит. за ПО	H ₂ O в кожухе ПО	Кожух ПО	ПО	τ , нс
–	+	–	–	55 ± 6
–	–	–	+	54 ± 6
–	+	–	+	60 ± 6
+	–	–	+	65 ± 5
+	+	–	+	60,5
+	+	+	+	67,5
–	–	–	–	50 ^{*)}

^{*)} Без учета основной биологической защиты.

Таблица 4. Величина $\delta\tau$, вносимая отдельными элементами конструкции реактора в среднее время жизни поколения нейтронов

Элемент конструкции реактора	$\delta\tau$, нс	
	Эксперимент	Расчет
Основные замедлители	0 ± 3	
Замедлитель за ПО	7 ± 4	7 ± 8
Натрий в активной зоне	5 ± 2	
Замена Fe-ДПО на Be	1 ± 2	
Замена штатного ПО макетом без кожуха и защиты	–15 ± 5	–8 ± 9
Биологическая защита за ПО		1 ± 9
Основная биологическая защита		4 ± 8
Компенсирующие регуляторы		7 ± 5
ОПО + ДПО		7 ± 8
МАЗ		3 ± 5
БАЗ + ПР + АР		4 ± 5

5. АНАЛИЗ РАСХОЖДЕНИЯ МЕЖДУ ЭКСТРАПОЛИРОВАННЫМИ ЗНАЧЕНИЯМИ $\beta_{эфф}$, ПОЛУЧЕННЫМИ В ШТАТНОМ ВАРИАНТЕ РЕАКТОРА И В ВАРИАНТЕ ЭПОС-2

Поскольку в любых измерениях τ фактически определяется лишь отношение $\beta_{эфф}/\tau$, а расхождение в оценках $\beta_{эфф}$ для штатного варианта реактора и для вариантов ЭПОС-2 велико, рассмотрим последнее обстоятельство более подробно. Причиной значительного расхождения между экспериментальной $\beta_{эфф}^*$ и расчетной $\beta_{эфф}$ оценками в варианте ЭПОС-2 может быть следующее:

величина $\Delta K/K$ определена с большой систематической погрешностью, но значение $\beta_{\text{эфф}}$ по отношению к штатному варианту реактора не изменилось (в этом случае для τ справедлива оценка, приведенная в табл. 1). Если же шкала реактивности была определена «правильно», то, как это ни парадоксально, значение $\beta_{\text{эфф}}$ при удалении части биологической защиты со стороны подвижного отражателя и удалении кожуха ПО увеличивается в 1,45–1,62 раз. В соответствующее число раз увеличивается и значение τ .

Во втором случае необходимо предположить наличие «комнатной» группы запаздывающих нейтронов β_k с эффективной долей

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

где

$$\bar{\beta}_{\text{эфф}}^* = \sum \beta_i^* \sigma_i^{-2} / \sum \sigma_i^{-2} = (3,38 \pm 0,11) \cdot 10^{-3}$$

— средневзвешенное по всем измерениям на ЭПОС-2 значение $\beta_{\text{эфф}}^*$. Поскольку форма распределения $P(t)\Delta t$ во всех случаях была одноэкспоненциальной (по критерию χ^2), то для константы спада предполагаемой группы «комнатных» нейтронов λ_k можно принять $\lambda_k < \frac{1}{\Delta T} \approx 60 \text{ с}^{-1}$, где $\Delta T = 150 \text{ мкс}$ — анализируемый в распределении интервал времени. Кроме того, ввиду большой величины β_k источник «комнатных» нейтронов не должен быть удален более чем на тридцать сантиметров от активной зоны. Отсюда для энергии этой группы нейтронов следует ограничение

$$E_k < (72,4 \cdot 0,3 \cdot \lambda_k)^2 \cong 0,02 \text{ эВ}.$$

Расчетные оценки доли альбедных нейтронов в геометрии ЭПОС-2 показали, что эффективное значение β_k не превышает 10^{-5} , а верхняя энергия значительной доли (до 10 %) альбедных нейтронов равна 3 МэВ, т. е. существенно превышает ее оценку в Росси- α -измерениях. Поэтому предположение о наличии большой группы «комнатных» нейтронов маловероятно.

Предположение о систематической погрешности в определении шкалы реактивности также маловероятно по следующим причинам. Действительно, калибровка регуляторов по методу «разгона» непосредственно на стенде не проводилась, а использовались данные, полученные в штатном состоянии реактора. Изменение шкалы реактивности могло произойти, если бы эффективность регуляторов при отодвигании подвижного отражателя с защитой изменилась. Позднее (на стенде ЭПОС-3) было отмечено, что при отодвигании штатного подвижного отражателя на один метр от активной зоны эффективность регуляторов не изменялась. Качественные оценки также показывали, что при полном удалении подвижного отражателя с защитой эффективность регуляторов не должна была измениться более чем на 10 %.

Таким образом, имеющиеся расчетные и экспериментальные данные не позволяют надежно объяснить расхождение между $\beta_{эфф}$ и $\beta_{эфф}^*$ присутствием «комнатной» группы запаздывающих нейтронов или же ошибкой в методике измерения реактивности.

Здесь необходимо отметить, что в ряде Росси- α -экспериментов на быстрых сборках с урановой зоной, например, на английской сборке «Vera» [5] и шведской FR-0 [6] экстраполяция константы спада мгновенных нейтронов в критическое состояние на мгновенных нейтронах давала точно такое же различие между экспериментальной и расчетной оценками доли запаздывающих нейтронов $\beta_{эфф}^*/\beta_{эфф} \approx 1,5$, что и в экспериментах ЭПОС-2 (с отодвинутой от активной зоны частью биологической защиты).

Дополнительные методы измерения и обработки данных (см. приложения 1, 2) согласуются с результатами Росси- α -измерений.

6. ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

1. В штатном варианте реактора величина τ равна (62 ± 2) нс. Замедлители, окружающие активную зону, кроме замедлителя за подвижным отражателем, практически не влияют на τ . Установка замедлителя за ПО увеличивает τ на (7 ± 4) нс.

2. Уменьшение величины τ по сравнению с данными физического пуска (83 нс) связано с усилением защиты активной зоны от нейтронов, рассеянных на основных замедлителях и кожухе подвижного отражателя. Частично уменьшению величины τ способствовала и замена ДПО. Сокращение длительности нейтронной вспышки только за счет уменьшения величины τ составило $\sim 10\%$, т. е. ~ 22 мкс.

3. Наибольшее влияние на τ оказывают конструктивные элементы модулятора реактивности (кожух подвижного отражателя и часть биологической 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.

4. В экспериментах Росси- α на стенде ЭПОС-2 при отодвинутой от зоны части биологической защиты было отмечено значительное расхождение между расчетным значением $\beta_{эфф}$ и экстраполированным в состоянии мгновенной критичности значением реактивности $\beta_{эфф}^*$. Отношение $\beta_{эфф}^*/\beta_{эфф}$ в среднем составило 1,5. Объяснения такой интерпретации Росси- α -измерений найдено не было.

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

ПРИЛОЖЕНИЕ 1 ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ τ

1. Оценка τ из анализа формы импульса мощности. В гауссовом приближении для формы импульса мощности при параболической зависимости реактивности вблизи мгновенной критичности полуширина вспышки $\vartheta_{1/2} = 2\sqrt{B \ln 2} \cdot \tau/\varepsilon_m$, где B — безразмерный параметр; ε_m — надкритичность в импульсе. Для равновесного режима при частоте повторения вспышек, равной 5 1/с, используя экспериментальные данные для $\vartheta_{1/2} = 215$ мкс, $B = 3,65$ и $\varepsilon_m = 1,06 \cdot 10^{-3}$, получим $\tau = 72 \pm 7$ нс. В погрешность величины τ входят погрешности измерения ϑ , B и ε_m .

2. Оценка τ из анализа флуктуаций энергии импульсов мощности. Согласно [7], при средней мощности реактора $W > 1$ Вт относительную дисперсию флуктуаций энергии импульсов мощности $(\sigma_Q/\bar{Q})^2$ можно представить в виде $(\sigma_Q/\bar{Q})^2 = \delta_0^2 + a/W$, где $a = \frac{D}{2\beta_{эфф}\tau LW}$; $D = 0,815$ — параметр Дайвена; W — мощность в ваттах, L — коэффициент перевода мощности, выраженной в дел./(с·Вт); δ_0^2 — относительная дисперсия, обусловленная флуктуациями внешней реактивности. Экспериментальная зависимость $(\sigma_Q/\bar{Q})^2$ от W имеет вид $(\sigma_Q/\bar{Q})^2 = \delta_0^2 + \frac{0,095 + 0,003}{W}$. Отсюда для штатного варианта реактора $\beta_{эфф} = 2,165 \cdot 10^{-3}$, $\delta_0^2 < 8 \cdot 10^{-4}$ и $L = 3,25 \cdot 10^{10}$ дел./(с·Вт), (192 МэВ/дел.) получим $a = 5,79 \cdot 10^{-9}/\tau = 0,095 + 0,003$ и $\tau = 61 \pm 2$ нс.

ПРИЛОЖЕНИЕ 2 ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЙ МЕТОД ОБРАБОТКИ РОССИ- α -ИЗМЕРЕНИЙ

Как известно, в Росси- α -измерениях величину $\beta_{эфф}/\tau$ можно определить из выражения, в котором реактивность в явном виде отсутствует:

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

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

$$\Delta(\beta_{эфф}/\tau) = \left[X^2 \Delta\alpha_1^2 + \Delta\alpha_2^2 + \frac{\alpha_2 - \alpha_1}{(1 - X)^2} \cdot \Delta X^2 \right], \quad \Delta X^2 = X^2 \left[\frac{1}{N_1} + \frac{1}{N_2} \right].$$

Оценка $\beta_{эфф}/\tau$ была получена для двух состояний реактора: штатного (без воды в кожухе подвижного отражателя и замедлителя) и для варианта (4–5)* на ЭПОС-2. Результаты обработки приведены ниже для штатного состояния

реактора $(\beta_{эфф}/\tau)_{ш} = (3,65 \pm 0,20) \cdot 10^4 \text{ с}^{-1}$, $\tau = 59 \pm 3 \text{ нс}$, и для варианта ЭПОС-2 $(\beta_{эфф}/\tau)_{э} = (4,71 \pm 0,1) \cdot 10^4 \text{ с}^{-1}$, $\tau = 46 \text{ нс}$. Полученные результаты хорошо согласуются с результатами основной обработки Росси- α -измерений: $\beta_{эфф}/\tau_{ш} = (3,55 \pm 0,12) \cdot 10^4 \text{ с}^{-1}$ и $\beta_{эфф}/\tau_{э} = (4,70 \pm 0,09) \cdot 10^4 \text{ с}^{-1}$ (см. табл. 1). Эти результаты не дают новой информации, но подтверждают отсутствие каких-либо систематических погрешностей в принятой методике измерения и обработки исходных экспериментальных данных.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гусев В. В. и др. Физический пуск реактора ИБР-2. Измерение среднего времени жизни поколения нейтронов. ОИЯИ, РЗ-12449. Дубна, 1979.
2. Ananiev V. D. et al. An optimization study of the reactivity modulator for the periodically pulsed fast reactor // Atomkernenergie Kerntechnik. 1983. V. 43. No. 4.
3. Ананьев В. Д. и др. Энергетический пуск реактора ИБР-2 и первые физические исследования на его пучках // АЭ. 1984. Т. 57, вып. 4. С. 227–234.
4. Orndoff J. P. // Nucl. Sci. 1957. V. 2. P. 450.
5. Weale J. W. et al. Pulsed Neutron Research // Proc. Symposium. Karlsruhe, May 1965. Vienna: IAEA. 1965. V. 2. P. 759.
6. Bergstrom A. et al. // Ibid. P. 357.
7. Шабалин Е. П. Импульсные реакторы на быстрых нейтронах. М.: Атомиздат, 1976.

Получено 10 августа 2006 г.

Редактор *Е. В. Сабеева*

Подписано в печать 02.11.2006.

Формат 60 × 90/16. Бумага офсетная. Печать офсетная.

Усл. печ. л. 0,75. Уч.-изд. л. 0,88. Тираж 315 экз. Заказ № 55536.

Издательский отдел Объединенного института ядерных исследований
141980, г. Дубна, Московская обл., ул. Жолио-Кюри, 6.

E-mail: publish@pds.jinr.ru

www.jinr.ru/publish/