

P13-2007-96

Ю. Н. Пепельшев

МЕТОД ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ ОЦЕНКИ  
ЭФФЕКТИВНОЙ ДОЛИ ЗАПАЗДЫВАЮЩИХ  
НЕЙТРОНОВ И ВРЕМЕНИ ЖИЗНИ ПОКОЛЕНИЯ  
НЕЙТРОНОВ РЕАКТОРА ИБР-2

Направлено в журнал «Annals of Nuclear Energy»

Пепельшев Ю. Н.

P13-2007-96

Метод экспериментальной оценки эффективной доли запаздывающих нейтронов и времени жизни поколения нейтронов реактора ИБР-2

Экспериментальные исследования стохастических шумов мощности импульсного реактора периодического действия ИБР-2, выполненные в стационарном и импульсном режимах его работы, позволили получить оценки основных параметров кинетики — эффективную долю запаздывающих нейтронов и среднее время жизни мгновенных нейтронов. Измерялись функционалы, связывающие между собой основные параметры кинетики: декремент затухания мгновенных нейтронов (стационарный режим) и относительная дисперсия флуктуаций энергии импульсов. Показано, что экспериментальные значения параметров кинетики близки к расчетным. Дополнительно из анализа нейтронных шумов оценена мощность источника спонтанных нейтронов.

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

Препринт Объединенного института ядерных исследований. Дубна, 2007

Pepolyshchev Yu. N.

P13-2007-96

Method of Experimental Estimation of the Effective Delay Neutron Fraction and of the Neutron Generation Lifetime in the IBR-2 Reactor

Experimental investigations of stochastic noises of the power of the IBR-2 periodic pulsed reactor carried out in the steady-state and in the pulsed modes of its operation made it possible to obtain estimations of the main parameters of the kinetics — the effective fraction of delayed neutrons and the average lifetime of prompt neutrons. Functionals were measured relating the main parameters of the kinetics: the prompt neutron decay constant (steady-state mode) and the relative dispersion of pulse energy fluctuations. It was shown that the experimental values of parameters of the kinetics are close to the calculated ones. In addition, the power of the spontaneous neutron source was estimated on the basis of the analysis of neutron noises.

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

Preprint of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna, 2007

## ВВЕДЕНИЕ

Во время физического и энергетического пусков реактора ИБР-2 были проведены многочисленные эксперименты по определению кинетических и динамических параметров реактора, в том числе, например, измерение среднего времени жизни поколения нейтронов в реакторе  $\tau$  [1] и флуктуаций энергии импульсов мощности [2]. В то же время, такой важный параметр кинетики, как эффективная доля запаздывающих нейтронов  $\beta_{эф}$ , оценивался только расчетным путем. С другой стороны, кинетика импульсного реактора периодического действия такова, что, в принципе, позволяет экспериментально оценить эффективную долю запаздывающих нейтронов и среднее время жизни поколения мгновенных нейтронов. Для этой цели можно совместно использовать экспериментальные данные по флуктуациям мощности и константе спада (декременту затухания) мгновенных нейтронов  $\alpha$ . Константа спада в критическом реакторе есть  $\beta_{эф}/\tau$ . Эта величина может быть измерена в стационарном (не импульсном) состоянии реактора, например, в экспериментах Росси- $\alpha$  [1, 3]. С другой стороны, особенностью импульсного реактора периодического действия является то, что относительная дисперсия флуктуаций энергии импульсов  $(\sigma_Q/\bar{Q})^2$  в некоторой области средней мощности ( $>10$  Вт) есть функция  $(\beta_{эф} \cdot \tau)^{-1}$  [4, 5]. Здесь  $\bar{Q}$  и  $\sigma_Q$  — среднее значение и стандартное отклонение энергии импульсов мощности. Совместное решение этих двух экспериментально определяемых функций позволяет получить оценки  $\beta_{эф}$  и  $\tau$ .

### 1. КРАТКОЕ ОПИСАНИЕ КОНСТРУКЦИИ РЕАКТОРА ИБР-2

Импульсный исследовательский реактор периодического действия на быстрых нейтронах ИБР-2 работает на частоте импульсов 5 Гц при средней мощности 2 МВт. В отличие от стационарных реакторов, в которых поддерживается постоянный поток нейтронов, реактор ИБР-2 генерирует периодические нейтронные импульсы, длительность которых на половине высоты на три порядка меньше интервала между импульсами ( $\theta_{1/2} = 215$  мкс). 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 объемным расходом от 80 до 110 м<sup>3</sup>/ч. Мимо одной из граней активной зоны проходят две вращающиеся соосно, 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 предназначены для компенсации выгорания плутония и отрицательного эффекта температурной реактивности. Стержень автоматического регулятора предназначен для поддержания мощности реактора на заданном уровне.

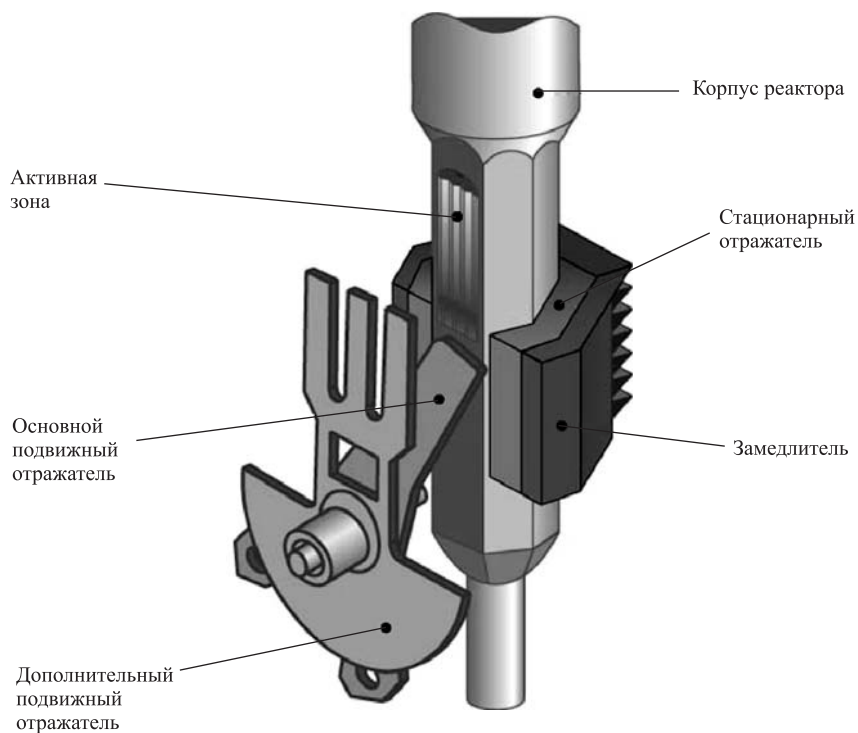


Рис. 1. Схема реактора ИБР-2 с модулятором реактивности ПО-2М

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  $^{235}\text{U}$ . В зависимости от задачи камеры использовались как в счетном, так и в токовом режимах.

## 2. МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЙ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

**2.1. Измерение константы спада (декремента затухания) мгновенных нейтронов. Эксперимент Росси- $\alpha$ .** Для измерения константы спада мгновенных нейтронов использовался метод Росси- $\alpha$ . В рамках одноточечной модели кинетики, справедливость которой для реактора ИБР-2 была показана в работе [1], для критического нулевой мощности или слегка подкритического состояния реактора вероятность связанных по цепочке отсчетов с детектора  $P(t)\Delta t$  в момент времени  $t$  в интервале  $\Delta t$  при условии регистрации нейтрона в момент времени  $t = 0$ , согласно [3], равна

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

где  $A, B$  и  $\alpha$  — константы, зависящие от ядерно-физических параметров активной зоны и условий измерений. В результате обработки данных можно оценить отношение  $B/A$  и величину  $\alpha$ , которые дают связи между реакторными параметрами:  $B/A = D_\nu \cdot k_p^2/2F\tau(1 - k_p)$ ,  $\alpha = (\beta_{\text{эф}} - \rho)/\Lambda = (1 - k_p)/\tau$  — асимптотическая константа спада мгновенных нейтронов, где  $k_p$  — коэффициент размножения мгновенных нейтронов,  $D_\nu$  — относительная дисперсия числа мгновенных нейтронов при делении,  $F$  — скорость делений в активной зоне,  $\rho = (k_{\text{эф}} - 1)/k_{\text{эф}}$  — реактивность,  $k_{\text{эф}}$  — эффективный коэффициент размножения,  $\Lambda, \tau$  — время генерации и время жизни поколения нейтронов соответственно. Выражение для  $B/A$  использовали для выбора наиболее оптимальных условий проведения эксперимента (скорости делений, подкритичности). Цель измерений состояла в определении зависимости параметра  $\alpha$  от реактивности. Поскольку для реактора критического на запаздывающих нейтронах  $\Lambda = \tau$ , уравнение для  $\alpha$  переходит в  $\alpha_c = \beta_{\text{эф}}/\Lambda = \beta_{\text{эф}}/\tau$  и можно записать

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

Так как речь идет об измерении фундаментальных параметров кинетики, остановимся поподробнее на технике измерений. Измерения проводили в подкритической области работы реактора. Подкритичность  $\Delta k_{\text{эф}}$  определяли по методу «обратного умножения»  $\Delta k_{\text{эф}}/k_{\text{эф}} = N_0/N$ , где  $N_0$  — эффективный «нулевой» счет,  $N$  — скорость счета детектора. Эффективный «нулевой» счет определяли по дифференциальной эффективности регулятора, измеренной по разгону реактора. Установившийся асимптотический период разгона

реактора  $T$  связан с реактивностью соотношением  $\rho/\beta_{эф} = \sum_{i=1}^6 a_i/(1 + \lambda_i T)$ , где  $a_i = \beta_i/\beta_{эф}$ ,  $\beta_i$  — эффективная доля запаздывающих нейтронов  $i$ -ой группы. Расчетное значение  $\beta_{эф} = 2,165 \cdot 10^{-3}$ . Подкритичность задавали в пределах от  $-1\%k_{эф}$  до  $-0,1\%k_{эф}$ , коэффициент размножения в диапазоне 0,990–0,999 соответственно.

Для измерений использовали временной анализатор с числом каналов 1024 шириной 0,5 мкс. В качестве детектора нейтронов — ионизационная камера деления в счетном режиме с  $^{235}\text{U}$ , установленная в центре активной зоны. Чувствительность камеры составляла  $10^{-5}$  имп./дел. Измерения проводили в штатном состоянии реактора для нескольких вариантов состояния водяных замедлителей, окружающих активную зону. Варианты отличались наличием или отсутствием воды в замедлителях. В каждом состоянии реактора декремент затухания измеряли не менее чем для трех уровней подкритичности. Незначительное изменение в положении органов регулирования, необходимое для задания нужного уровня подкритичности, не влияло на чувствительность детектора и, соответственно, на величину  $\tau$ . Значения  $\alpha$ , полученные путем обработки распределений Росси- $\alpha$  одной экспонентой, аппроксимировали затем зависимостью (1) в функции реактивности  $\rho/\beta_{эф}$ . Конечным результатом обработки являлись два параметра:  $\alpha_c$  — значение  $\alpha$  в состоянии критичности ( $k_{эф} = 1$ ) и  $\rho^*/\beta_{эф}$  — экстраполированное для  $\alpha = 0$  значение реактивности (реактивность  $\rho^*$  есть доля запаздывающих нейтронов, а состояние реактора при  $\alpha = 0$  — состояние мгновенной критичности). Если шкала реактивности определена без грубой систематической погрешности, отношение  $\rho^*/\beta_{эф} = 1$ . Во всех измерениях не было получено ни одного статистически значимого результата, который бы указывал на отклонение экспериментальных данных от одноточечного представления кинетики ИБР-2 (все измеренные распределения  $P(t)\Delta t$  содержали только одну экспоненту). Значения  $\alpha$  в зависимости от реактивности приведены на рис. 2. Как следует из рис. 2, экстраполированное для  $\alpha = 0$  значение реактивности в долях  $\beta_{эф}$  практически равно единице: 1,00092.

**2.2. Измерение дисперсии стохастических флуктуаций энергии импульсов мощности.** Согласно [4–6] относительную дисперсию флуктуаций энергии импульсов мощности  $\Delta_Q^2 = (\sigma_Q/\bar{Q})^2$  можно представить в виде

$$\Delta_Q^2 = \Delta_{st}^2(1 + \delta_0^2) + \delta_0^2, \quad (2)$$

где  $\sigma_Q = \frac{1}{(N-1)^{1/2}} \sqrt{\sum_{n=1}^N (Q_n - \bar{Q})^2}$  и  $\bar{Q}$  — среднеквадратическое отклонение и среднее значение энергии импульсов соответственно;  $N$  — число импульсов;  $\Delta_{st}^2 = \frac{\nu D_\nu}{2S\tau}$  — стохастические флуктуации энергии импульсов;

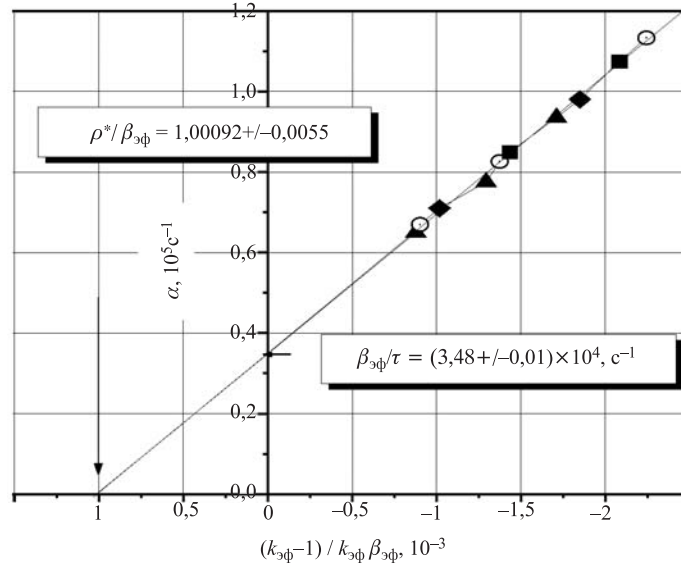


Рис. 2. Зависимость константы спада мгновенных нейтронов от реактивности и линейная экстраполяция к критическому состоянию на мгновенных нейтронах. Усреднение по всем измеренным состояниям реактора:  $\odot$  — воды в кожухе подвижного отражателя и замедлителя нет;  $\blacktriangle$  — вода в замедлителях есть, из кожуха подвижного отражателя слита;  $\blacklozenge$  — вода в кожухе подвижного отражателя есть, в замедлителях нет;  $\blacksquare$  — вода в кожухе подвижного отражателя и замедлителях есть

$D_\nu = 0,815$  — относительная дисперсия числа нейтронов в одном акте деления;  $\nu$  — число нейтронов в одном акте деления;  $\delta_0^2$  — флуктуации мощности, обусловленные флуктуациями внешней реактивности, например, механическими колебаниями подвижных отражателей;  $S$  — интенсивность постоянно действующего во время импульса источника нейтронов. При условии малости флуктуаций внешней реактивности  $\delta_0^2 \ll 1$ , что для ИБР-2 справедливо при мощности  $W < 10$  кВт ( $\delta_0^2 \approx 4 \cdot 10^{-4}$ ), выражение (2) для полных флуктуаций энергии импульсов имеет вид

$$(\sigma_Q/\bar{Q})^2 \approx \delta_0^2 + \Delta_{st}^2. \quad (3)$$

Для стохастических шумов можно записать

$$\Delta_{st}^2 = \frac{\nu D_\nu}{2\tau(S_{sp} + \beta_{эф}\nu F)},$$

где интенсивность источника нейтронов  $S$  представлена в виде суммы спонтанных  $S_{\text{сп}}$  и запаздывающих нейтронов

$$S = S_{\text{сп}} + \beta_{\text{эф}} \cdot \nu \cdot F,$$

$F$  — скорость делений. В зависимости от средней мощности реактора в источнике нейтронов могут доминировать спонтанные или запаздывающие нейтроны. Для ИБР-2 оценки граничной мощности следующие:

$$\begin{aligned} S &\approx S_{\text{сп}}, && \text{при } W < 0,1 \text{ Вт;} \\ S &\approx \beta_{\text{эф}} \cdot \nu \cdot F && \text{при } W > 10 \text{ Вт.} \end{aligned}$$

Здесь использовали следующие значения параметров:  $\nu = 2,9$  нейтр./дел.,  $S_{\text{сп}} = 7,7 \cdot 10^7$  нейтр./с (расчетная оценка),  $F = L \cdot W = 3,25 \cdot 10^{10}$  [дел./с · Вт] · W [Вт]. Энергия деления, выделяющаяся в активной зоне, была взята 192 МэВ/дел. (см. ниже в тексте). Отсюда наблюдаемые флуктуации энергии импульсов в зависимости от мощности равны:

$$\begin{aligned} (\sigma_Q/\bar{Q})^2 &\approx \delta_0^2 + M; \quad M = \frac{\nu D_\nu}{2\tau \cdot S_{\text{сп}}}, \\ W < 0,12 \text{ Вт} &— \text{область спонтанных нейтронов;} \\ (\sigma_Q/\bar{Q})^2 &\approx \delta_0^2 + \frac{C}{W}; \quad C = \frac{D_\nu}{2\tau \beta_{\text{эф}} L}, \end{aligned}$$

$W > 10$  Вт — область запаздывающих нейтронов.

Значения  $M$  и  $C = d(\sigma_Q/\bar{Q})^2/d(1/W)_{1/W \rightarrow 0}$  — экспериментально определяемые величины. Флуктуации энергии импульсов исследовали в диапазоне средней мощности от 0,07 до 200 Вт. Энергия импульсов измерялась путем интегрирования импульса тока с ионизационной камеры, помещенной в центральный канал активной зоны. Значение энергии последовательных импульсов мощности запоминалось в памяти ЭВМ, образуя временной ряд. В дальнейшем использовалась обычная процедура статистического анализа временных рядов. Вычислялись плотность распределения энергии импульсов и параметры этого распределения, в том числе и относительная дисперсия. Дополнительно для измерения флуктуаций энергии импульсов использовался сцинтилляционный детектор быстрых нейтронов по протонам отдачи на основе ФЭУ и пластикового сцинтиллятора. Детектор устанавливался на одном из горизонтальных каналов вблизи активной зоны. Дисперсия шумов мощности, измеренная с помощью сцинтилляционного детектора, несколько превышала аналогичный показатель для ионизационной камеры. Это было связано с высоким уровнем статистических флуктуаций при регистрации одного нейтрона в сцинтилляторе и недостаточной статистической точностью регистрации числа нейтронов за вспышку. В работе приведены данные, полученные с помощью ионизационной камеры, где статистические шумы регистрации нейтронов были значительно меньше измеряемых флуктуаций мощности. Уровень мощности, характеризующийся большими стохастическими



флуктуациями энергии импульсов (до  $\sim 80\%$ ), определялся по счетному монитору мощности [7]. Монитор был откалиброван в стационарном состоянии реактора в режиме непрерывной (не импульсной) мощности по умножению источника и по тепловыделению в активной зоне. Экспериментальная зависимость  $(\sigma_Q/\bar{Q})^2$  от обратной мощности  $1/W$  показана на рис. 3.

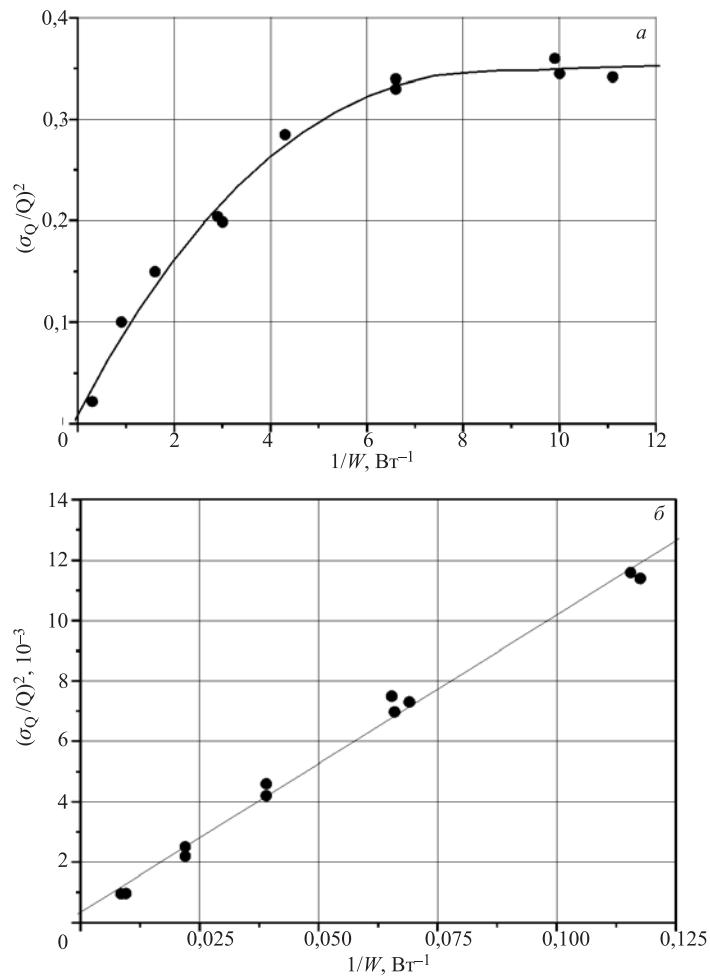


Рис. 3. Зависимость относительной дисперсии  $(\sigma_Q/\bar{Q})^2$  флуктуаций энергии импульсов реактора ИБР-2 от обратной мощности ( $1/W$ ). На рис. 3, б показан начальный участок кривой

Линейная аппроксимация этой зависимости при  $1/W \Rightarrow 0$  имеет вид  $(\sigma_Q/\overline{Q})^2 = 4 \cdot 10^{-4} + \frac{0,095 \pm 0,003}{W}$  (см. рис. 3, б),  $C = 0,095 \pm 0,003$ . Средние флуктуации мощности в области слабого источника ( $1/W > 8 \text{ Вт}^{-1}$ ) дают  $M = 0,345 \pm 0,01$ .

### 3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ОЦЕНКИ $\beta_{\text{эф}}$ , $\tau$ И ИСТОЧНИКА СПОНТАННЫХ НЕЙТРОНОВ $S_{\text{сп}}$

Как видно из раздела 2, экспериментально определены три параметра:  $M$ ,  $C$  и  $\alpha_c$ :

$$C = \frac{D_\nu}{2L\beta_{\text{эф}}\tau} = 0,095 \pm 0,003;$$

$$\alpha_c = \frac{\beta_{\text{эф}}}{\tau} = (3,48 \pm 0,01) \cdot 10^4 \text{ с}^{-1};$$

$$M = \frac{\nu D_\nu}{2\tau \cdot S_{\text{сп}}} = 0,345 \pm 0,01.$$

Численные значения параметров, входящих в вышеприведенную систему уравнений, для удобства представлены в таблице. Подставляя значения параметров в уравнения для  $C$  и  $\alpha_c$ , имеем

$$\beta_{\text{эф}} \cdot \tau = (1,32 \pm 0,04) \cdot 10^{10} \text{ с}, \quad (4)$$

$$\frac{\beta_{\text{эф}}}{\tau} = (3,48 \pm 0,01) \cdot 10^4 \text{ с}^{-1}.$$

Решение системы (4) дает следующие результаты:

$$\beta_{\text{эф}} = \{D_\nu \cdot \alpha_c / (2 \cdot C \cdot L)\}^{1/2} =$$

$$= \{0,815 \cdot 3,48 \cdot 10^4 / (2 \cdot 0,095 \cdot 3,25 \cdot 10^{10})\}^{1/2} = (2,140 \pm 0,06) \cdot 10^{-3};$$

$$\tau = (61,6 \pm 2) \text{ нс}.$$

Расчетные значения  $\beta_{\text{эф}} = 2,165 \cdot 10^{-3}$ ,  $\tau = (59 \pm 7) \text{ нс}$ . Из выражения для  $M$  оценим мощность источника спонтанных нейтронов

$$S_{\text{сп}} = \frac{\nu \cdot D_\nu}{2 \tau \cdot 0,345} = (5,56 \pm 0,16) \cdot 10^7 \text{ нейтр./с}.$$

В погрешность  $\beta_{\text{эф}}$  и  $\tau$  входят только погрешности определения параметров  $C$  и  $\alpha_c$ . Важным параметром, определяющим систематическую

**Численные значения используемых величин**

Значение параметра	Примечание
$D_\nu = 0,815 \pm 0,017$	Относительная дисперсия числа мгновенных нейтронов при делении. Параметр Дайвена
$E_f = 192$ МэВ	Энергия, выделяющаяся на один акт деления в активной зоне
$L = 3,25 \cdot 10^{10}$ дел./с·Вт)	Коэффициент пересчета мощности на интенсивность делений
$\alpha_c = (3,48 \pm 0,01) \cdot 10^4$ с <sup>-1</sup>	Эксперимент (Росси- $\alpha$ )
$C = 0,095 \pm 0,003$	Эксперимент (стохастические флуктуации импульсов мощности)
$M = 0,345 \pm 0,01$	Относительная дисперсия флуктуаций энергии импульсов в области малой мощности
$\beta_{эф} = 2,165 \cdot 10^{-3}$	Расчетное значение эффективной доли запаздывающих нейтронов
$\beta_{эф} = (2,140 \pm 0,06) \cdot 10^{-3}$	Экспериментальное значение эффективной доли запаздывающих нейтронов
$\tau = 59 \pm 7$ нс	Расчетное значение времени жизни поколения нейтронов в активной зоне ИБР-2
$\tau = 61,6 \pm 2$ нс	Экспериментальное значение времени жизни поколения нейтронов в активной зоне ИБР-2
$S_{сп} = (5,56 \pm 0,16) \cdot 10^7$ нейтр./с	Экспериментальная оценка источника запаздывающих нейтронов

погрешность величин  $\beta_{эф}$  и  $\tau$ , является значение энергии, выделяющейся в активной зоне, на один акт деления,  $E_f$ . Величина  $E_f$  входит в искомые оценки через коэффициент преобразования скорости делений в экспериментально определяемую мощность  $L = 3,25 \cdot 10^{10}$  дел./с·Вт), 1 Вт =  $= 1/(1,602 \cdot 10^{-13} \cdot E_f)$  дел./с, [ $E_f$ ] в МэВ. Относительно величины  $E_f$  для плутония отметим следующее: в литературе наблюдается большой разброс в ее оценке, от 202 до 210 МэВ (с антинейтрино). Наиболее полный и достаточно современный анализ данных по величине  $E_f$  и отдельных ее компонент приведен в работе [8].

Рекомендуемое в работе [8] значение  $E_f = 198,5$  МэВ справедливо для энергетических реакторов в условиях теплового равновесия. В нашем случае (малая зона, большая утечка нейтронов и гамма-квантов за пределы зоны, неравновесное состояние активности продуктов деления, неустановившийся нагрев бетонной защиты и т. д.) величина  $E_f$  принималась равной 192 МэВ/дел.

Здесь учитывалось также энерговыделение от радиационного захвата нейтронов в активной зоне.

## ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

Исследования стохастических флуктуаций нейтронной мощности ИБР-2 в стационарном и импульсном режимах работы реактора позволяют экспериментально оценить основные параметры кинетики — эффективную долю запаздывающих нейтронов, среднее время жизни поколения мгновенных нейтронов, а также мощность источника спонтанных нейтронов. Показано, что экспериментальные результаты для реактора ИБР-2 близки к расчетным значениям.

## ЛИТЕРАТУРА

1. *Гусев В. В. и др.* Физический пуск реактора ИБР-2. Измерение среднего времени жизни поколения нейтронов. Сообщение ОИЯИ Р3-12449. Дубна, 1979.
2. *Пепельшев Ю. Н.* Измерение и анализ флуктуаций энергии импульсов мощности реактора ИБР-2. Сообщение ОИЯИ 13-88-58. Дубна, 1988.
3. *Orndoff J. P.* Prompt Neutron Periods of Metal Critical Assemblies // Nucl. Sci. Engineering. 1957. V. 2, P. 450.
4. *Шабалин Е. П.* Импульсные реакторы на быстрых нейтронах: М.: Атомиздат, 1976.
5. *Говорков А. Б., Козик Б.* О статистике амплитуд вспышек реактора ИБР. Препринт ОИЯИ Р-2076. Дубна, 1965.
6. *Люй Минь и др.* Экспериментальное исследование флуктуаций импульсного реактора // Атомная энергия. 1964. Т. 16, вып. 1. С. 12.
7. *Пепельшев Ю. Н. и др.* Система мониторинга мощности реактора ИБР-2 для проведения экспериментов во время энергетического пуска. Сообщение ОИЯИ 13-84-701. Дубна, 1984.
8. *Галанин А. Д.* Введение в теорию ядерных реакторов на тепловых нейтронах. М.: Энергоатомиздат, 1990.

Получено 29 июня 2007 г.

Редактор *М. И. Зарубина*

Подписано в печать 10.10.2007.

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

Усл. печ. л. 0,81. Уч.-изд. л. 0,99. Тираж 305 экз. Заказ № 55917.

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

E-mail: [publish@jinr.ru](mailto:publish@jinr.ru)

[www.jinr.ru/publish/](http://www.jinr.ru/publish/)