

СРАВНЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ВРЕМЕНИ ЖИЗНИ МГНОВЕННЫХ НЕЙТРОНОВ В АЗ ИЯУ ЯГУАР И ИГРИК-2 СТАТИСТИЧЕСКИМИ МЕТОДАМИ

В. В. Захаров, О. А. Мингазов, В. И. Черашев, И. А. Жиховский, С. В. Шугаев, С. Г. Порубов, А. А. Манаков, А. А. Кузинская

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИТФ им. академика Е. И. Забабахина», г. Снежинск Челябинской обл.

Статья поступила в редакцию 16.05.2022, после доработки – 23.06.2022, принята к публикации – 20.09.2022

Представлены результаты определения времени жизни мгновенных нейтронов в реакторах ЯГУАР и ИГРИК-2 тремя различными статистическими методами. Кратко описана экспериментальная установка и приведена схема эксперимента. Проведено сравнение результатов, полученных методами Бабала, Фейнмана и автокорреляционного анализа. Сделаны выводы о применимости этих методов.

Ключевые слова: импульсный ядерный реактор, время жизни мгновенных нейтронов, реактивность, константа Росси-альфа, метод Бабала, метод Фейнмана, автокорреляционный анализ.

Comparison of the results of determining the lifetime of instantaneous neutrons in the core of the IGRIK-2 and YAGUAR reactors by statistical methods. V. V. Zakharov, O. A. Mingazov, V. I. Cherashev, I. A. Zhikhovsky, S. V. Shugaev, S. G. Porubov, A. A. Manakov, A. A. Kuzinskaya (FSUE «RFNC-VNIITF», 456770, Snezhinsk, Chelyabinsk region, Vasilyev street, 13). The results of determining the lifetime of instantaneous neutrons in the YAGUAR and IGRIK-2 reactors by three different statistical methods are presented. The experimental facility has been briefly described and the experimental scheme is given. A comparison of the results obtained by the methods of Babala, Fejnman and autocorrelation analysis was carried out. Conclusions are drawn about the applicability of these methods.

Key words: pulse nuclear reactor, lifetime of instantaneous neutrons, reactivity, Rossi-alpha constant, Babala method, Feynman method, autocorrelation analysis.

DOI 10.53403/02054671_2022_3_85

Введение

В рамках физического пуска реактора ИГРИК-2 проведены эксперименты по определению постоянной спада при критичности на запаздывающих нейтронах (константы Росси-альфа) и времени жизни мгновенных нейтронов. Постоянная спада мгновенных нейтронов определяется как

$$\alpha_c = \frac{\rho - \beta_{эф}}{\Lambda},$$

где ρ – реактивность; $\beta_{эф}$ – эффективная доля запаздывающих нейтронов; Λ – время генерации мгновенных нейтронов.

Для систем, критических на запаздывающих нейтронах, постоянная спада имеет специальное название – константа Росси-альфа – и равна

$$\alpha_R = \frac{\beta_{эф}}{l},$$

где l – время жизни мгновенных нейтронов.

Основной целью исследования является определение константы Росси-альфа α_R для импульсного ядерного реактора ИГРИК-2. Дополнительно изучено влияние характерных облучаемых образцов на время жизни мгновенных нейтронов в реакторе ИГРИК-2; проверена применимость различных статистических методов для измерения времени жизни мгновенных нейтронов в реакторах ИГРИК-2 и ЯГУАР.

В статье приведено краткое описание экспериментальной установки для определения постоянной спада, описана методика проведения эксперимента, приведены результаты обработки полученных данных статистическими методами: Бабала, Фейнмана и автокорреляционного анализа; проведено сравнение результатов, полученных этими методами.

Методика проведения и схема эксперимента

Методика проведения эксперимента заключалась в следующем. АЗ реактора приводилась к выбранной конфигурации (устанавливались или удалялись облучаемые образцы). Вблизи АЗ реактора размещался блок детектирования нейтронов. Реактор выводился в известное подкритическое состояние, после чего штатный источник нейтронов удалялся от АЗ за биологическую защиту. После завершения переходного процесса начинался набор экспериментальных данных: фиксировались временные отсчеты в моменты регистрации нейтронов блоком детектирования. При этом цепочки мгновенных нейтронов в АЗ реактора инициировались «внутренним источником» нейтронов (под которым понимается сумма запаздывающих нейтронов, нейтронов спонтанного деления, нейтронов от γ - n реакций и внешнего фона нейтронов).

Реактор переводился в различные подкритические состояния, и измерения повторялись. Затем полученные данные обраба-

тывались одним из статистических методов (Бабала, Фейнмана или автокорреляционного), в результате чего получалась табличная зависимость постоянной спада от реактивности. Далее методом наименьших квадратов строилась линейная аппроксимация $\alpha(\rho)$ с учетом того, что $\alpha(\beta_{эф}) = 0$. Подстановкой в полученное выражение значения $\rho = 0$ определялось значение α_R .

Реактивность в процессе экспериментов измерялась методом Попова [1]. Для сбора экспериментальных данных была разработана специальная система регистрации. Схема размещения блока детектирования относительно АЗ реактора показана на рис. 1. Блок детектирования нейтронов содержит 6 счетчиков медленных нейтронов на основе ^3He , окруженных полиэтиленовым замедлителем. Счетчики разработаны и изготовлены в ЛНФ ОИЯИ (г. Дубна); по основным параметрам близки к серийно производимым СНМ-18. Эскиз конструкции счетчика приведен на рис. 2.

Блок замедлителя имеет толщину 90 мм, высоту – 500 мм; эскиз конструкции блока замедлителя приведен на рис. 3. Счетчики размещены в соответствующих отверстиях

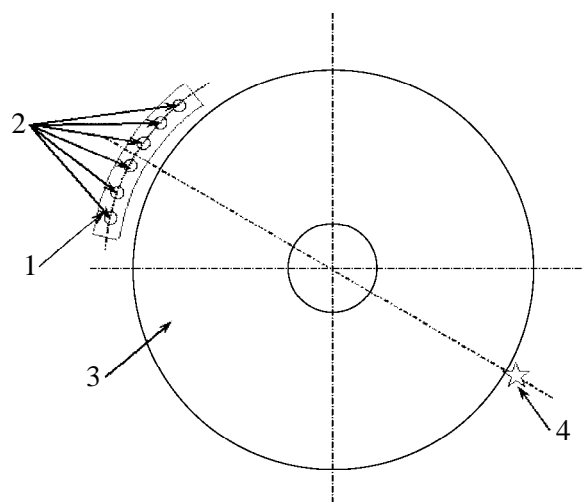


Рис. 1. Схема размещения блока детектирования: 1 – блок детектирования, 2 – счетчики медленных нейтронов, 3 – АЗ реактора, 4 – штатный источник нейтронов



Рис. 2. Эскиз конструкции счетчика

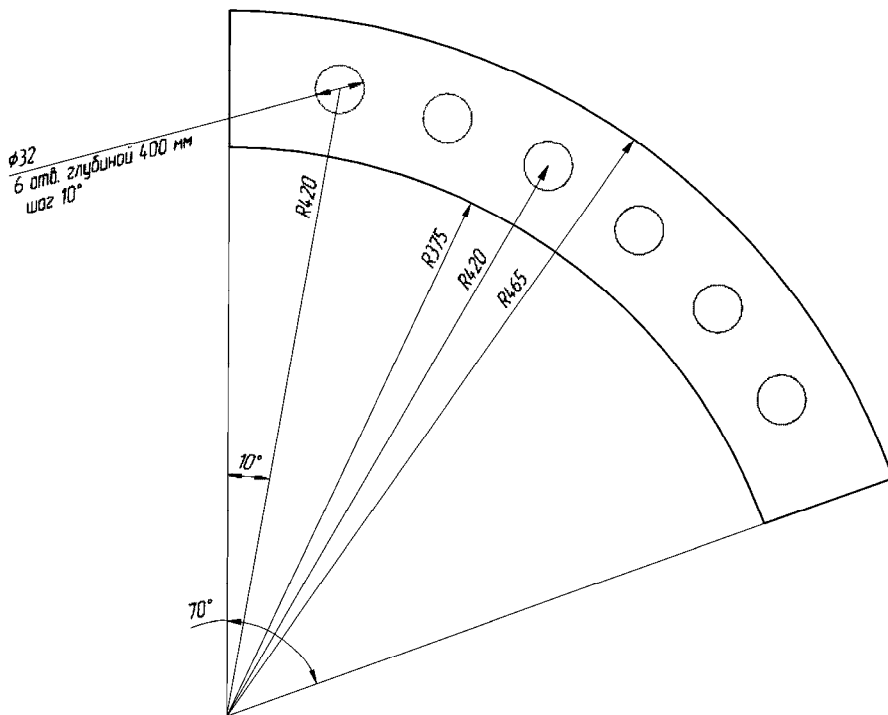


Рис. 3. Эскиз конструкции блока замедлителя

блока замедлителя. Электрические сигналы со счетчиков поступают на усилители-дискриминаторы и далее передаются на обработку в логический блок, который записывает информацию о моментах прихода импульсов в каждом из каналов в буферную память и затем передает эти данные на персональный компьютер (по интерфейсу RS485). Дискретность измерения времени логическим блоком составляет 100 нс.

Логический блок выполнен на основе программируемой логической интеграль-

ной схемы (ПЛИС) FPGA EP4CE10E22C8 семейства Cyclone IV E (изготовитель — фирма Altera). Исходный код написан на языке Verilog в среде разработки Quartus II.

Программное обеспечение системы регистрации

Для работы с системой регистрации разработано специальное программное обеспечение, состоящее из двух программ: управления системой регистрации и пред-

варительной обработки данных. Программа управления системой регистрации обеспечивает прием данных по интерфейсу RS485, буферирование данных в памяти и запись данных в файл на жесткий диск. Программа предварительной обработки данных позволяет построить и сохранить в файле гистограмму распределения счетно-счетных интервалов для дальнейшей обработки по методу Бабала, график отношения дисперсии скорости счета к среднему значению для обработки по методу Фейнмана и зависимость скорости счета нейтронов от времени для обработки корреляционным методом.

Экспериментальная проверка системы регистрации

Для проверки работоспособности системы регистрации были построены гистограммы распределения счетно-счетных интервалов от Pu-Be источника нейтронов. Акты регистрации нейтронов от α - n источника подчиняются распределению Пуассона. Если пренебречь мертвым временем счетчиков нейтронов, можно показать, что гистограмма распределения счетно-счетных интервалов должна иметь вид

$$P_{cc}(n) = Ae^{-\lambda\Delta(n-1)},$$

где λ – средняя скорость счета нейтронов, c^{-1} ; Δ – ширина временного интервала гистограммы, с; n – номер интервала гистограммы; $A = N_0(1 - e^{-\lambda\Delta})$ – константа нормировки, зависящая от общего числа зарегистрированных событий N_0 .

На рис. 4 в качестве примера приведена одна из полученных гистограмм и ее аппроксимация, построенная средствами программы Microsoft Excel.

Анализ результатов экспериментов с Pu-Be источником подтвердил работоспособность системы регистрации.

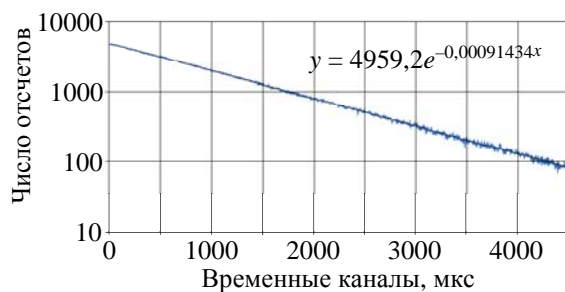


Рис. 4. Гистограмма счетно-счетных интервалов от Pu-Be источника (общее число зарегистрированных нейтронов – 1086365, средняя скорость счета – 914,0 c^{-1})

Методы обработки экспериментальных данных

Применимость статистических методов измерения нейтронно-физических характеристик определяется временем жизни нейтронов в реакторной системе. Возможность поддержания состояния системы, когда цепочки делений нейтронов не «перекрываются», т. е. цепочки делений нейтронов разделены промежутком времени, определяет применение того или иного статистического метода.

Предварительные оценки показали, что в диапазоне реактивности $-2\beta_{эф}$ до $-0,4\beta_{эф}$ в активной зоне реактора ИГРИК-2 в среднем одновременно существуют от ~ 2 до ~ 15 параллельных цепочек деления, обусловленных «внутренним» источником. В таких условиях метод Бабала имеет ряд преимуществ по сравнению с другими статистическими методами [2], поэтому он был выбран в качестве основного.

Метод Бабала

Метод Бабала использует распределение длин интервалов между отсчетами (гистограмму счетно-счетных интервалов). Бабала вывел следующие выражения для распределения счетно-счетных интервалов [2]:

$$p_{cc}(t)dt = C_1(t)dt + C_2(t)\exp(-\alpha\gamma t)dt, \quad (1)$$

причем

$$C_1(t) = 4F\varepsilon\rho_0(t) \times \left[\frac{(\gamma+1) + (\gamma-1)\exp(-\alpha\gamma t)}{(\gamma+1)^2 - (\gamma-1)^2 \exp(-\alpha\gamma t)} \right]^2; \quad (2)$$

$$C_2(t) = \frac{8F\varepsilon\rho_0(t)\gamma^2}{\sigma \left[(\gamma+1)^2 - (\gamma-1)^2 \exp(-\alpha\gamma t) \right]^2}; \quad (3)$$

где F – интенсивность делений в подкритической системе, с^{-1} ; ε – эффективность детектора к делениям в системе 1/дел; α – постоянная спада мгновенных нейтронов, с^{-1} ; \bar{c} – средняя скорость счета детектора нейтронов, с^{-1} ; σ – коэффициент, эквивалентный мощности источника нейтронов, безразмерный, определяется выражением

$$\sigma = \frac{S\Lambda}{D_v}, \quad (4)$$

где S – мощность нейтронного источника в подкритической системе.

Вероятность отсутствия счета в интервале от 0 до $tp_0(t)$ $p_0(t)$ определяется выражением

$$\ln p_0(t) = -\frac{2\bar{c}t}{\gamma+1} \left\{ 1 + \frac{2}{(\gamma-1)\alpha t} \times \ln \left[\frac{(\gamma+1)^2 - (\gamma-1)^2 \exp(-\alpha\gamma t)}{4\gamma} \right] \right\}. \quad (5)$$

Безразмерный параметр распределения γ определяется как

$$\gamma = \left(1 + 2 \frac{\varepsilon D_v}{\rho_p^2} \right)^{1/2}, \quad (6)$$

где $D_v \approx 0,8$ – фактор Дайвона; $\rho_p = \rho - \beta_{эф}$ – реактивность системы по мгновенным нейтронам.

Для обработки полученных в экспериментах гистограмм распределения счетно-счетных интервалов в среде MatLab была

написана соответствующая программа Babala.m. В программе реализована аппроксимация диаграммы по уравнению (1) путем подбора коэффициентов α , σ , ε методом наименьших квадратов с учетом зависимостей (2)–(6).

На рис. 5 в качестве иллюстрации приведена гистограмма счетно-счетных интервалов, полученная на реакторе ИГРИК-2 (реактивность $\rho = -0,26\beta_{эф}$, установлен образец из бериллия); на гистограмму наложена аппроксимирующая кривая, полученная в результате работы программы Babala.m. Соответствующее значение постоянной спада $\alpha = 310 \text{ с}^{-1}$.

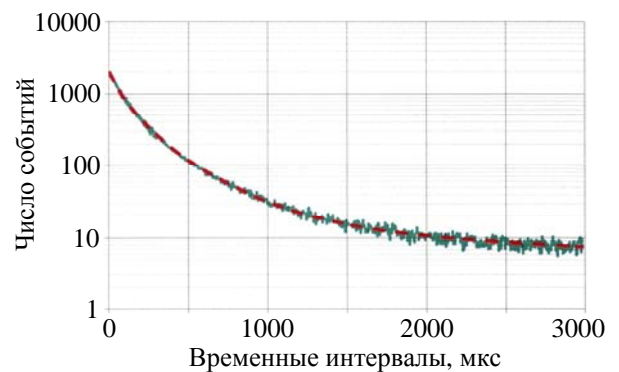


Рис. 5. Гистограмма счетно-счетных интервалов, $\rho = -0,26\beta_{эф}$

Метод Фейнмана

Метод Фейнмана рассматривает отношение дисперсии к среднему числу отсчетов, происходящих в размножающей системе за данный временной интервал. Аналитически зависимость отношения дисперсии к среднему числу отсчетов описывается формулой Фейнмана [3]

$$\frac{\overline{c^2} - \bar{c}^2}{\bar{c}} - 1 = \frac{\varepsilon D_v}{(\alpha\Lambda)^2} \left(1 - \frac{1 - e^{-\alpha\tau}}{\alpha\tau} \right), \quad (7)$$

где $\frac{\overline{c^2} - \bar{c}^2}{\bar{c}}$ – отношение дисперсии числа отсчетов в интервале τ к средней скорости

счета за время τ ; ε – эффективность системы регистрации; Λ – время жизни поколения мгновенных нейтронов, c ; τ – длительность интервала, с.

Вводя обозначения

$$A = \frac{\overline{c^2} - \bar{c}^2}{\bar{c}}, \quad K = \frac{\varepsilon D_v}{\Lambda^2},$$

приводим формулу (7) к виду, удобному для проведения аппроксимации,

$$A - 1 = \frac{K}{\alpha^2} \left(1 - \frac{1 - e^{-\alpha\tau}}{\alpha\tau} \right). \quad (8)$$

Для построения аппроксимации экспериментальных зависимостей дисперсии скорости счета к среднему значению была разработана программа «Feinman». В программе реализовано построение нелинейной аппроксимации по двум параметрам, K и α , согласно формуле (8) методом наименьших квадратов. Программа разработана в среде LabView. На рис. 6 приведены экспериментальные кривые и аппроксимирующие графики, построенные в программе «Feinman».

Из рис. 6 видно, что существует расхождение экспериментальных и аппроксимирующих данных, которое объясняется влиянием запаздывающих нейтронов, и это расхождение тем выше, чем выше реактивность. Для анализа расхождения были построены графики зависимости относительного отклонения от τ , рассчитанного по формуле

$$\Delta(\tau) = \frac{A(\tau) - F(\tau)}{A_{\max}} \times 100\%,$$

где $A(\tau)$ – данные аппроксимации; $F(\tau)$ – экспериментальные данные; A_{\max} – максимум аппроксимации; график построен в диапазоне изменения τ от 0 до 0,1 с.

При рассмотрении зависимости относительного отклонения $\Delta = (A - F)/\text{Max}(A)$ от длительности интервала (рис. 7) видно, что минимальные значения относительного отклонения (по модулю не более 0,5%) находятся в диапазоне значений τ от 0,0 до 0,03 с. Поэтому максимальное значение интервала τ при обработке данных программой «Feinman» были ограничены величиной 0,03 с.

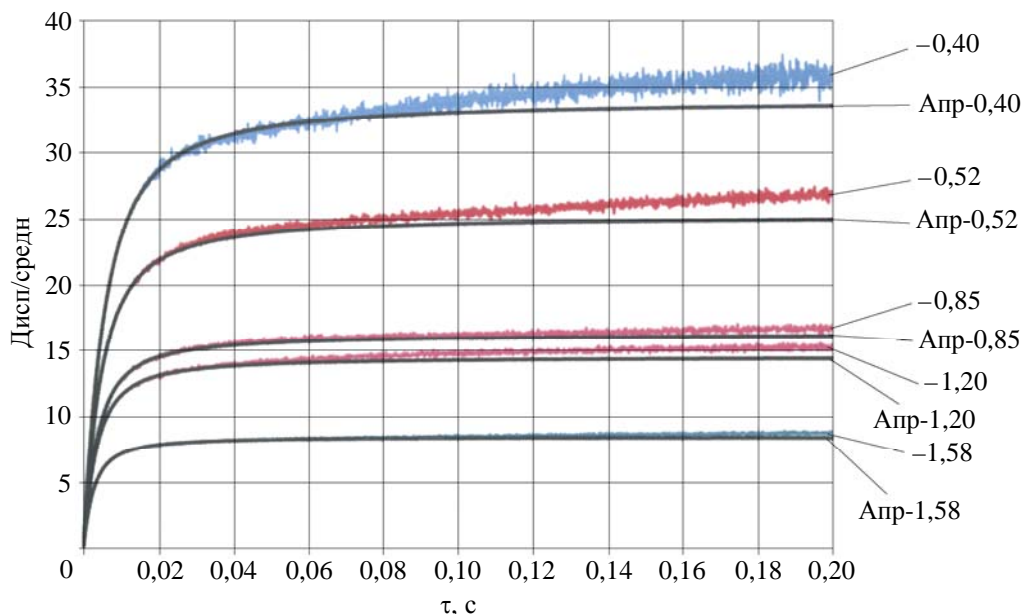


Рис. 6. Экспериментальные и расчетные зависимости отношения дисперсии к среднему от длительности интервала для различных значений ρ для реактора ИГРИК-2 (цифры справа от графика – соответствующая реактивность $\beta_{эф}$)

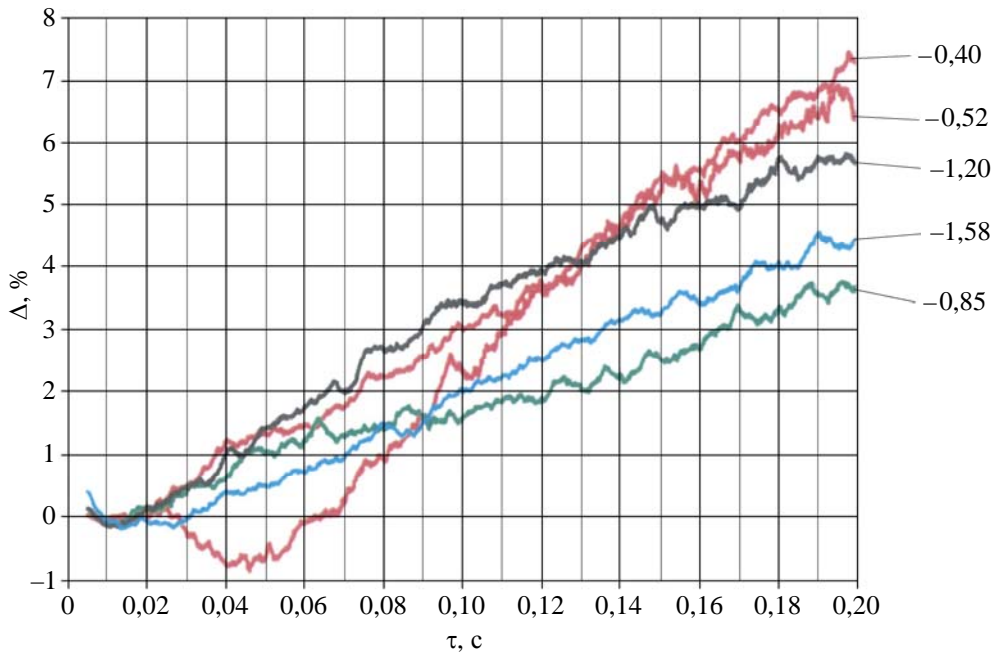


Рис. 7. График зависимости $\Delta(\tau)$ для различных значений ρ

Метод автокорреляционного анализа

При обработке данных методом автокорреляционного анализа исследуется автокорреляционная функция, которая характеризует вероятность появления пары отсчетов с интервалом τ ; теоретически она имеет вид [2]

$$\varphi_{xx}(\tau) = F^2 \varepsilon^2 + F \varepsilon^2 \frac{D_v k_p^2}{2(1-k_p)l} \exp(-\alpha\tau) + F \varepsilon \delta(\tau).$$

Если исключить дельта-функцию Дирака при $\tau = 0$ и ввести обозначения

$$A = F^2 \varepsilon^2, \quad B = F \varepsilon^2 \frac{D_v k_p^2}{2(1-k_p)l},$$

получим следующее выражение, удобное для выполнения аппроксимации экспериментальных данных:

$$\varphi_{xx}(\tau) = A + B \exp(-\alpha\tau). \quad (9)$$

Для обработки данных методом автокорреляционного анализа в среде LabView

написана программа AutoCorr. Программа позволяет по экспериментальным данным построить функцию автокорреляции и выполнить ее аппроксимацию по выражению (9). На рис. 8 приведено рабочее окно программы с графиком построенной программой автокорреляционной функции (для АЗ ИГРИК-2 с образцом из В₄С, $\rho = -1,33\beta_{эф}$).

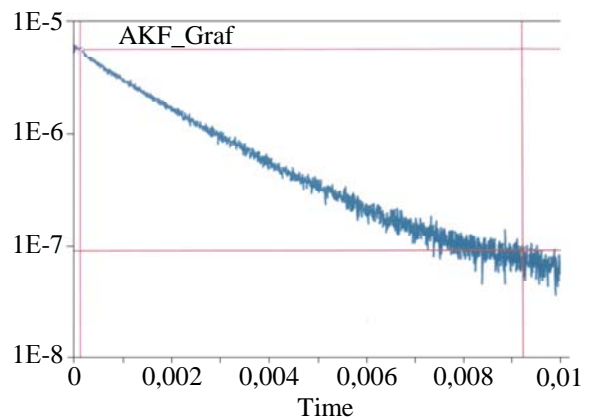


Рис. 8. Рабочее окно программы AutoCorr – график автокорреляционной функции

Анализ построенных автокорреляционных функций показал, что их не удается аппроксимировать выражением (9) с приемлемой точностью. Следует отметить, что случайные или фоновые величины зависят от квадрата скорости делений F^2 , в то время как амплитуда перед экспонентой зависит от F . Следовательно, применимость метода ограничивается очень низкими скоростями делений.

Результаты экспериментов

На реакторе ИГРИК-2 эксперименты проведены для четырех различных конфигураций АЗ: для «голой» АЗ (без облучаемых образцов) и с массивными образцами из карбида бора, бериллия и полиэтилена, размещенными в центральном экспериментальном канале АЗ. Измерения проводились в диапазоне изменения реактивности от $-0,25$ до $-1,9\beta_{эф}$. Результаты обработки экспериментальных данных, полу-

ченных на реакторе ИГРИК-2, методом Бабала представлены в табл. 1.

По данным табл. 1 для каждой конфигурации эксперимента получено значение константы Росси-альфа α_R путем линейной аппроксимации методом наименьших квадратов зависимости $\alpha = f(\rho)$ с дополнительным требованием $\alpha(\beta_{эф}) = 0$, т. е. аппроксимирующая функция была задана в виде

$$\alpha(\rho) = \alpha_R(1 - \rho),$$

где варьированию МНК подвергался один коэффициент α_R . На рис. 9 в качестве иллюстрации приведен график аппроксимации зависимости $\alpha(\rho)$ для «голой» АЗ.

Полученные значения α_R и времени жизни мгновенных нейтронов для всех конфигураций эксперимента, полученные методом Бабала, сведены в табл. 2. Время жизни мгновенных нейтронов рассчитано по формуле

$$l_{мгн} = \frac{\beta_{эф}^{расч}}{\alpha_R}, \quad (10)$$

Таблица 1

Зависимость постоянной спада от реактивности, полученная методом Бабала

Конфигурация эксперимента	№ п/п	Реактивность ρ , $\beta_{эф}$	Постоянная спада α , c^{-1}
«Голая» АЗ	1	-0,36	336
	2	-0,83	458
	3	-1,17	545
	4	-1,62	676
В ₄ С	1	-0,40	378
	2	-0,86	495
	3	-1,33	626
	4	-1,85	778
Ве	1	-0,26	310
	2	-0,75	435
	3	-1,11	515
	4	-1,48	620
	5	-1,79	700
Полиэтилен	1	-0,39	357
	2	-0,83	473
	3	-1,41	635

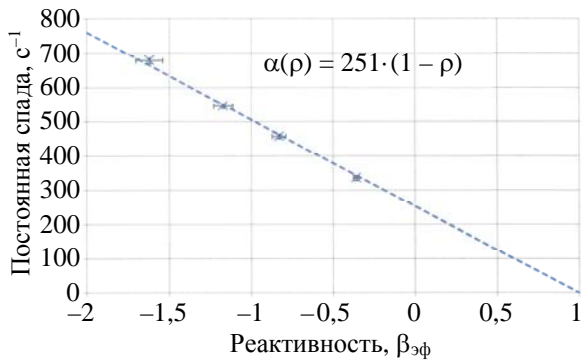


Рис. 9. Аппроксимация постоянной спада α для «голой» АЗ

где $\beta_{эф}^{расч} = 6,7 \cdot 10^{-3}$ – расчетное значение эффективной доли запаздывающих нейтронов для реактора ИГРИК-2. При расчетах $l_{мгн}$ по формуле (10) погрешность $\beta_{эф}^{расч}$ не учитывалась.

Таблица 2

Значения постоянной α_R и времени жизни мгновенных нейтронов на реакторе ИГРИК-2, найденные методом Бабала

Конфигурация АЗ	Постоянная спада α_R, c^{-1}	Время жизни мгновенных нейтронов $l_{мгн}, мкс$
«Голая» АЗ	254 ± 7	$26,4 \pm 0,7$
В ₄ С	270 ± 7	$24,8 \pm 0,7$
Полиэтилен	261 ± 6	$25,7 \pm 0,6$
Ве	249 ± 7	$26,9 \pm 0,7$

Из данных табл. 2 видно, что установка образца В₄С привела к уменьшению времени жизни мгновенных нейтронов на ~1,7 мкс (~6%), образец из полиэтилена уменьшил время жизни на ~0,7 мкс (~2,5%), образец из бериллия увеличил время жизни на ~0,5 мкс (~2%). В целом, образцы оказали слабое влияние на время жизни мгновенных нейтронов, близкое или даже меньшее величины погрешности измерений.

В табл. 3 представлены результаты обработки тех же самых экспериментальных данных методом Фейнмана.

Таблица 3

Значения постоянной α_R и времени жизни мгновенных нейтронов на реакторе ИГРИК-2, найденные методом Фейнмана

Конфигурация АЗ	Постоянная спада α_R, c^{-1}	Время жизни мгновенных нейтронов $l_{мгн}, мкс$
«Голая» АЗ	251 ± 13	$26,7 \pm 1,3$
В ₄ С	250 ± 13	$26,8 \pm 1,3$
Полиэтилен	250 ± 13	$26,8 \pm 1,3$
Ве	244 ± 12	$27,5 \pm 1,4$

Расчетное время жизни мгновенных нейтронов для «голой» АЗ реактора ИГРИК-2 составляет 29,0 мкс, относительное отклонение полученных результатов от этого значения составляет:

- методом Бабала – минус 9,0%;
- методом Фейнмана – минус 7,9%.

На реакторе ЯГУАР измерения проведены в одной конфигурации – без загрузки облучаемых образцов. Диапазон изменения реактивности составил от -1,8 до -4,0 $\beta_{эф}$. Результаты, полученные разными методами обработки, сведены в табл. 4. Для «голой» АЗ реактора ЯГУАР из опыта эксплуатации известна константа Росси-альфа $\alpha_R = 1410$. Отклонение полученного значения α_R от этого значения также приведены в таблице.

Таблица 4

Значения α_R и времени жизни мгновенных нейтронов на реакторе ЯГУАР

Метод обработки	Постоянная спада α_R, c^{-1}	Отклонение α_R от принятой величины, %
Бабала	1400 ± 120	0,7
Фейнмана	1400 ± 130	0,7

Выводы

На реакторе ИГРИК-2 при отсутствии облучаемых образцов методы Бабала и Фейнмана дали близкие между собой результаты, однако с существенным ~10% отклонением от расчетного. Установление причины расхождений требует дальнейших исследований. Установка образцов в АЗ ИГРИК-2 показала, что они оказали незначительное влияние на время жизни, практически в пределах погрешности измерений.

На реакторе ЯГУАР методы Бабала и Фейнмана дали одинаковые результаты, которые очень хорошо согласуются с принятыми значениями.

В целом, результаты исследований показали удовлетворительную применимость методов Бабала и Фейнмана на реакторах ИГРИК-2 и ЯГУАР.

Результаты исследования показали также, что применимость метода автокорреляционного анализа к реакторам ИГРИК-2 и ЯГУАР ограничивается очень низкими скоростями делений.

Список литературы

1. Попов В. А. Применение обращенного уравнения кинетики реактора для контроля реактивности подкритических размножающих систем // Атомная энергия. – 1997. Т. 82, вып. 3, с. 238–241.

2. Уриг Р. Статистические методы в физике ядерных реакторов. – М.: Атомиздат, 1974, 400 с.

3. Леваков Б. Г., Лукин А. В., Магда Э. П., Погребов И. С., Снопков А. А., Терехин В. А. / Под ред. А. В. Лукина // Импульсные ядерные реакторы РФЯЦ-ВНИИТФ. – Снежинск: Изд-во РФЯЦ-ВНИИТФ, 2002, с. 269–277.

Контактная информация –

Захаров Владимир Витальевич,
ведущий инженер-исследователь специзделий,
ФГУП «РФЯЦ-ВНИИТФ»,
e-mail: dep5@vniitf.ru

Вопросы атомной науки и техники. Сер. Физика ядерных реакторов, 2022, вып. 4, с. 85–94.