

ИЗУЧЕНИЕ КИНЕТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ РАЗМНОЖАЮЩЕЙ СИСТЕМЫ С АКТИВНОЙ ЗОНОЙ ИЗ ^{239}Pu (98 %) БЕЗ ОТРАЖАТЕЛЯ НА УСТАНОВКЕ ФКБН-3

Клоков Сергей Сергеевич (otd4@expd.vniief.ru), Гуменных Эдуард Алексеевич, Кайгородов Алексей Анатольевич, Паширина Ольга Юрьевна, Самаров Артем Вячеславович, Финогеев Сергей Васильевич, Хоружий Валентин Харлампиевич

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», г. Саров Нижегородской обл.

Проведены эксперименты по определению кинетических параметров размножающей системы с активной зоной из ^{239}Pu (98 %) в δ -фазе на стенде критических сборок ФКБН-3. Получено экспериментальное значение постоянной Росси- α при критичности на запаздывающих нейтронах. Экспериментально-расчетными способами получено время жизни мгновенных нейтронов τ . Проведено сравнение экспериментальных данных с расчетными значениями.

Ключевые слова: металлический плутоний-239, размножающая система, ФКБН-3, постоянная Росси- α , время жизни мгновенных нейтронов, корреляционный анализ.

RESEARCHING KINETIC PARAMETERS OF MULTIPLYING SYSTEM WITH AN ACTIVE ZONE OF ^{239}PU (98 %) IN THE δ -PHASE WITHOUT REFLECTOR AT CRITICAL TEST BENCH FKBN-3

Klokov Sergey Sergeevich (otd4@expd.vniief.ru), Gumennykh Eduard Alkseevich, Kajgorodov Aleksey Anatolievich Pasharina Olga Yurievna, Samarov Artem Vyacheslavovich, Finogeev Sergey Vasilievich, Khoruzhy Valentin Harlampievich

FSUE «RFNC-VNIIEF», Sarov Nizhny Novgorod region

Determining kinetic parameters experiments of multiplying system with an active zone of ^{239}Pu (98 %) in the δ -phase were performed at critical test bench FKBN-3. The experimental value of the Rossi- α constant at criticality on delayed neutrons is obtained. The lifetime of prompt neutrons has been obtained by experimental methods and numerical simulation. A comparison of experimental and calculated data was carried out.

Key words: metal plutonium-239, multiplying system, FKBN-3, Rossi- α constant, lifetime of prompt neutrons, correlation analysis.

Введение

Изучение кинетики нейтронов в размножающих системах (РС) является важной частью экспериментальных исследований на стенде критическихборок ФКБН-3 [1]. Исследуемыми кинетическими параметрами являются: постоянная Росси – α (постоянная спада плотности потока нейтронов) при критичности на запаздывающих нейтронах, время жизни мгновенных нейтронов τ , эффективная доля запаз-

дывающих нейтронов $\beta_{\text{эфф}}$. Получать кинетические параметры в экспериментах напрямую не представляется возможным. Непосредственно регистрируемой в эксперименте характеристикой является спад цепочек деления при некоторой реактивности ρ РС. Используя эти данные, можно определить постоянную спада α_0 и время жизни мгновенных нейтронов τ .

Целью данной работы является получение кинетических параметров – постоянной спада α_0 и времени жизни мгновенных нейтронов τ – РС с активной зоной (АЗ) из ^{239}Pu (98 %) в δ -фазе с дальнейшим сравнением полученных данных с результатами численного моделирования. Сравнение проводилось между расчетами, полученными с использованием различных библиотек ядерно-физических констант (ЯФК), и результатами, полученными в ходе данной работы и полученными ранее на комплексе ФКБН-2М [2].

Описание эксперимента

Исследование проводилось на РС с АЗ из ^{239}Pu (98 %) в δ -фазе. Схема исследуемой РС представлена на рис. 1.

РС собиралась из деталей тестовой сборки pmf-022 [3]. Система из сферических деталей разбита на симметричные части. Нижняя часть собиралась на конической подставке на стенде критических сборок ФКБН-3. Верхняя часть размещалась на стальной диафрагме. Сам стенд установки ФКБН-3 находится в зале 12×10×8 м, имеющем толстые бетонные стены и потолок толщиной от 1 до 3 м в качестве биологической защиты.

На комплексе ФКБН-3 определение постоянной спада плотности потока нейтронов производилось при помощи комплекса быстродействующего регистрирующего измерительного комплекса (БРИК), основанного на программно-аппаратном комплексе NMIS (*Nuclear Materials Identification System*) [4]. БРИК получает спад путем корреляционного анализа флуктуации потока излучения из РС. В результате анализа получают корреляционные функции сигналов с детекторов. Временная развертка корреляционных функций составляет 4096нс.

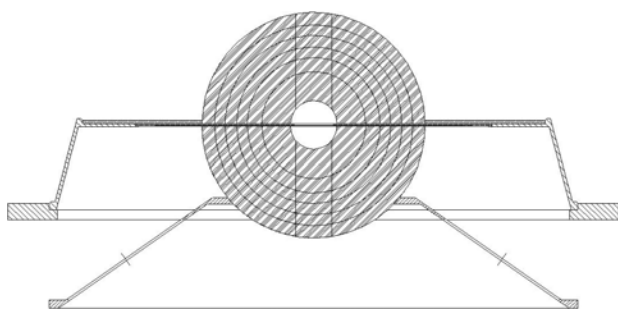


Рис. 1. Схематичное изображение РС с активной зоной из ^{239}Pu (98 %) в δ -фазе

В ходе эксперимента использовались два сцинтилляционных детектора, чувствительных к нейтронному и гамма излучению. Располагались детекторы в коллиматоре диаметром ≈ 40 см в стене зала на расстоянии ≈ 5 м от РС. Такое расположение было выбрано для уменьшения влияния отраженных от стен нейтронов на итоговый сигнал.

Сигнал с детекторов представляет собой смесь нейтронной и гамма компоненты излучения. Для изучения влияния большой пролетной базы на регистрацию спада цепочек делений из смешанного сигнала детектора выделялась нейтронная компонента. Для этого использовалась схема разделения сигналов по форме импульса [5]. Регистрируемый спад при высоких реактивностях ($-1 - -2 \rho/\beta_{\text{эфф}}$) не выходит на асимптоту за 4 мкс. Для увеличения временной развертки использовался блок генерации задержки сигнала на 4 мкс. В ходе экспериментов на комплекс БРИК поступало 4 сигнала. Выходными данными являлись 4 автокорреляционных и 6 корреляционных функций.

Регистрация спадов цепочек делений проводилась при различных значениях реактивности системы. Для РС в состоянии, близком к критике (более $-1 \rho/\beta_{\text{эфф}}$), проведение измерений спадов затруднено из-за высокого фона излучения, так как спонтанное деление приводит к ухудшению соотношения коррелированных и некоррелированных совпадений. С другой стороны, в глубоко подкритической системе цепочки делений затухают намного быстрее, из-за чего резко возрастает время, требуемое для набора необходимой статистики. В проведенных экспериментах был выбран интервал значений реактивности от $-0,98 \rho/\beta_{\text{эфф}}$ до $-6,14 \rho/\beta_{\text{эфф}}$. Реактивность определялась методом обращенного решения уравнения кинетики (ОРУК) [6] штатными каналами измерения в составе системы управления и защиты.

Эффективная доля запаздывающих нейтронов $\beta_{\text{эфф}}$ для данной РС определялась расчетным способом. Проводились численное моделирование исследуемой РС с использованием различных библиотек ЯФК. После нахождения эффективной доли запаздывающих нейтронов полученные величины усреднялись. Погрешность такого определения – погрешность среднего при использовании разных библиотек ЯФК. Для исследуемой РС было получено значение $\beta_{\text{эфф}} = 0,00190 \pm 0,00006$.

Определение постоянной спада плотности потока нейтронов

Выходные данные представляют собой набор корреляционных и автокорреляционных функций входных сигналов. Пример выходных данных для автокорреляционной функции представлен на рис. 2.

Основной задачей обработки данных является нахождение наилучшей аппроксимации функцией вида

$$f(t) = A e^{-\alpha t} + C,$$

где A – коэффициент, выражающий коррелированные отсчеты, C – коэффициент, выражающий некоррелированные отсчеты (фон), α – постоянная спада

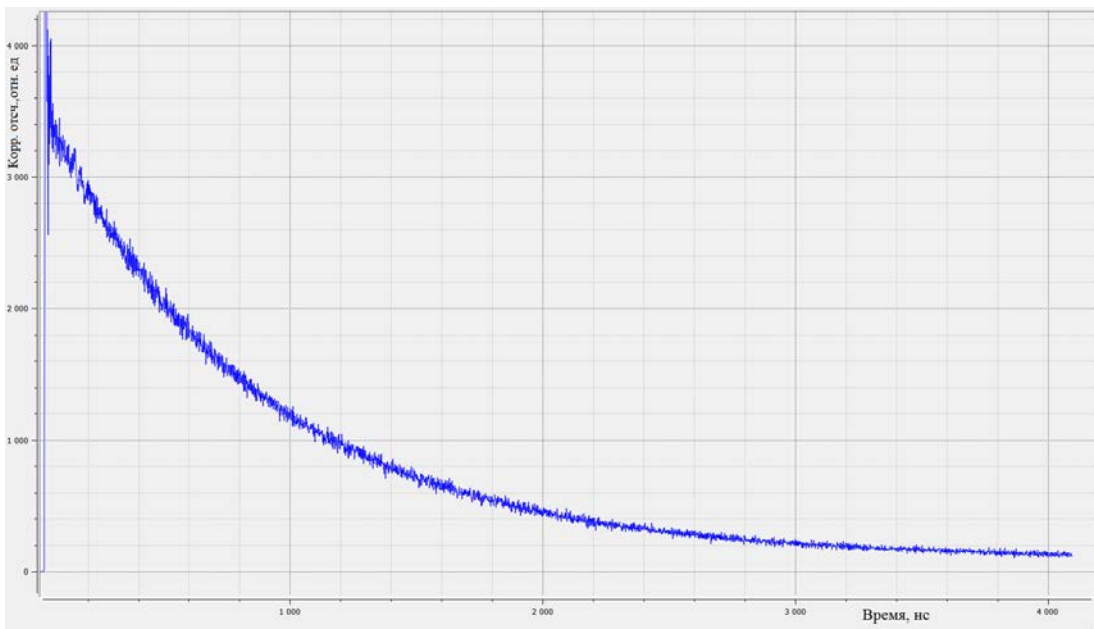


Рис. 2. Внешний вид части автокорреляционной функции, содержащей спад

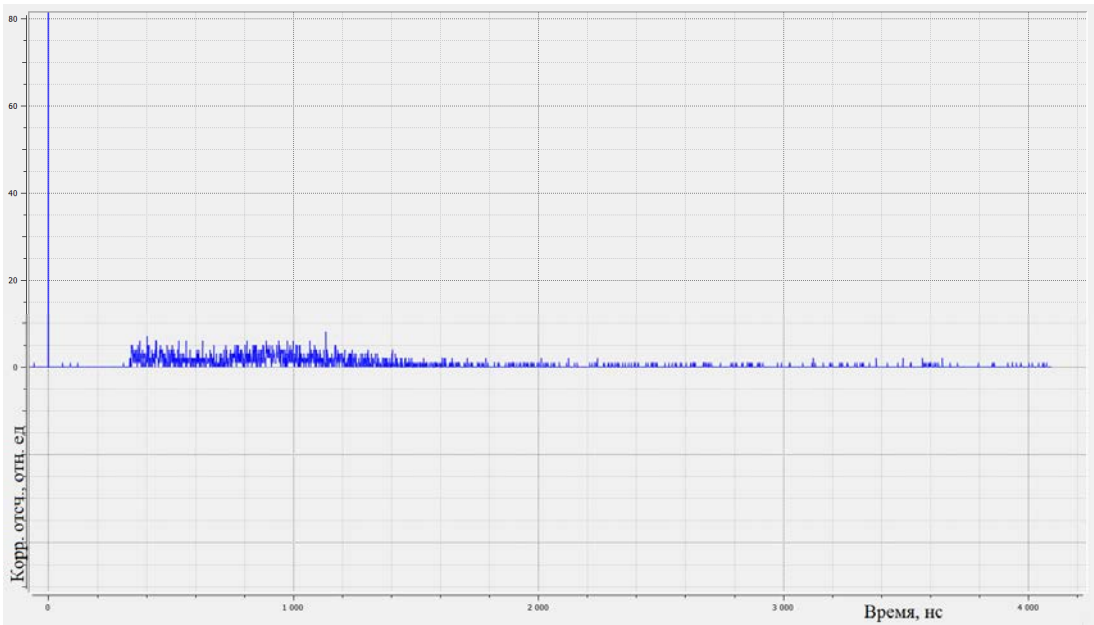


Рис. 3. Вид автокорреляционной функции, не поддающейся обработке

цепочек делений (мкс^{-1}), t – время от начала спада (мкс).

При варьировании интервала аппроксимации постоянная спада α меняется. Для выбора устойчивого значения постоянной спада временной интервал аппроксимации менялся отбрасыванием точек с начала спада. При каждом отбрасывании определялась новая постоянная спада. Таким образом, получалась зависимость $\alpha(t)$, где t – отброшенное время в нс от начала спада. Для реализации данного алгоритма в РФЯЦ ВНИИЭФ была разработана программа FallFactor.

Не все данные поддаются обработке. Например, при слабом или задержанном сигнале автокорреляционная функция не имеет явного спада. Пример такой функции приведен на рис. 3.

Одновременно с определением постоянной спада определялась постоянная спада α_0 из соотношения Симмонса – Кинга [7]:

$$\frac{\rho}{\beta_{\text{эфф}}} = 1 - \frac{\alpha}{\alpha_0}. \quad (1)$$

Конечным результатом обработки являлись зависимости $\alpha(t)$ и $\alpha_0(t)$ для всех корреляционных

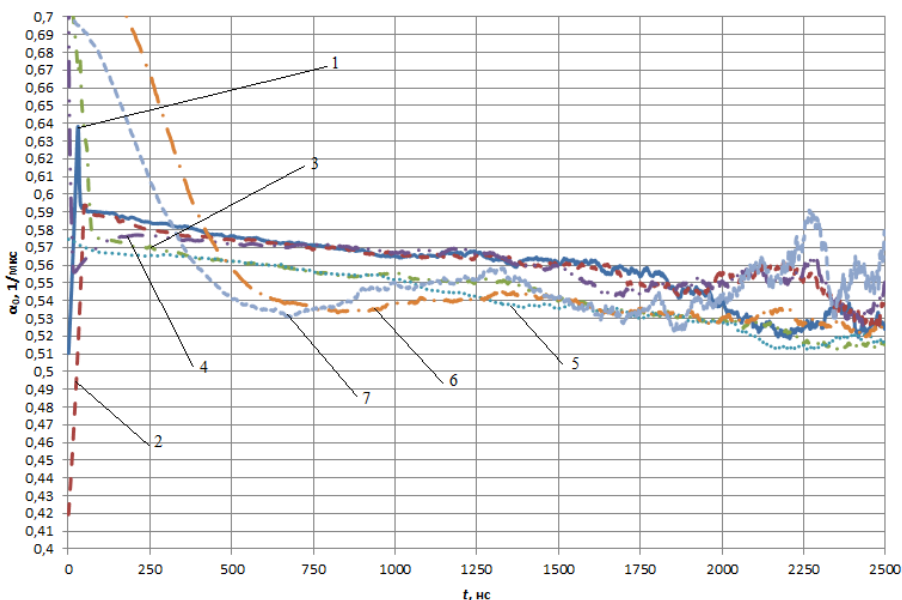


Рис. 4. Зависимости спадов $\alpha_0(t)$ при реактивности $\rho = -0,98 \beta_{эфф}$ по результатам обработки: 1 – АС [1], 2 – АС [3], 3 – СС [1–2], 4 – СС [1–3], 5 – СС [2–3], 6 – СС [2–4], 7 – СС [3–4]

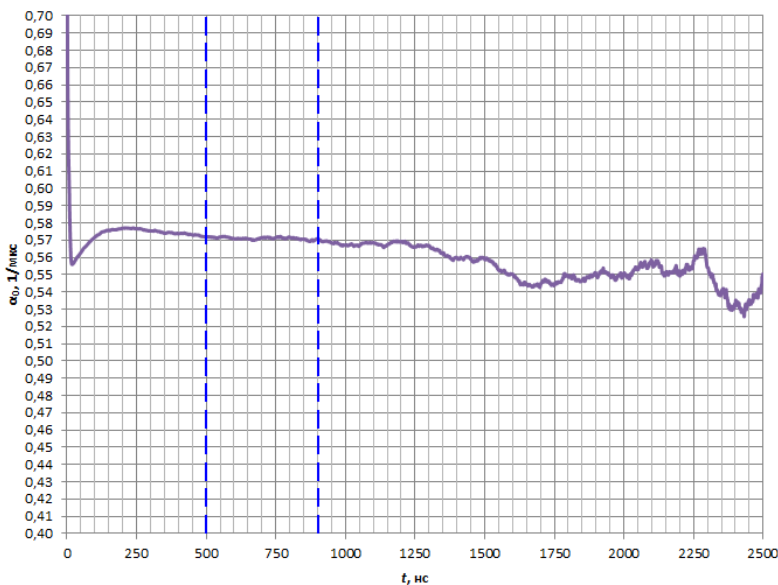


Рис. 5. Зависимость спада $\alpha_0(t)$ функции СС [1–3] при реактивности $\rho = -0,98 \beta_{эфф}$

функций. На рис. 4 приведены зависимости $\alpha_0(t)$ корреляционных функций для реактивности $\rho = -0,98 \beta_{эфф}$. Не представлены результаты обработки функций АС [2], АС [4] и СС [1–4], так как они не поддаются обработке.

При постепенном увеличении отступа от начала спада происходит изменение значений α для всех корреляционных функций. Наиболее стабильными являются функции АС [1], АС [3], СС [1–2] и СС [1–3]. Это две автокорреляционные функции сигналов детекторов, корреляционная функция сигнала одного детектора с задержанным сигналом вто-

рого детектора, корреляционная функция незадержанных сигналов двух детекторов соответственно. Для функций, включающих в себя канал с незадержанным сигналом с выделенной нейтронной компонентой (канал 4), определить устойчивое значение постоянной спада не представляется возможным. Зависимость $\alpha(t)$ для функции СС [1–2] является достаточно устойчивой, так как временная развертка составляет ≈ 8 мкс (из-за задержки одного сигнала). При увеличении времени отступа от начала спада уменьшается размер массива для аппроксимации, из-за чего наблюдается увеличение отклонений. Для

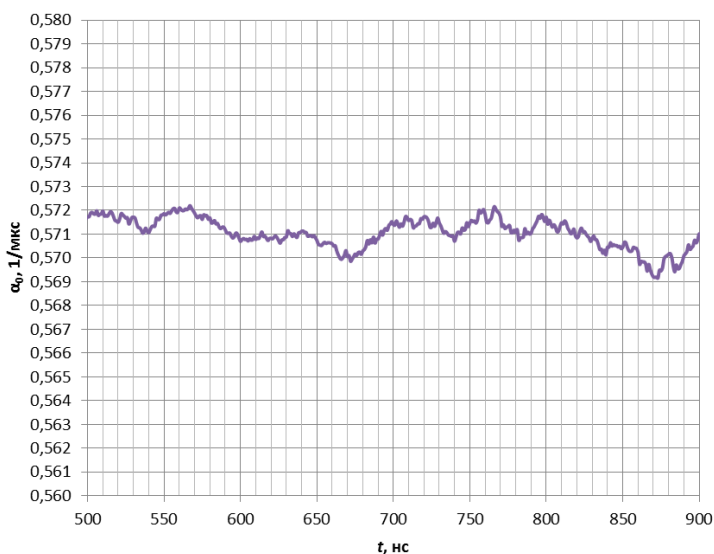


Рис. 6. Выделенный для дальнейшей обработки участок зависимости $\alpha_0(t)$ функции СС [1-3] при реактивности $\rho = -0,98 \beta_{эфф}$

данной реактивности после времени ~ 2 мкс видны «выбросы» значений постоянных спада.

Для каждой функции $\alpha(t)$ находилась временной интервал, на котором зависимость находилась на устойчивом уровне (отклонение не превышало 2%). Этот интервал определялся для каждой корреляционной функции и реактивности. На рис. 5 представлен пример выбора интервала для функции СС [1-3] на реактивности $\rho = -0,98 \beta_{эфф}$. Постоянная спада сильно меняется в начале зависимости и в конце. На интервале от 500 нс до 900 нс значение α_0 остается устойчивым. Амплитуда колебаний значений составляет $0,003 \text{ мкс}^{-1}$. Зависимость постоянной спада функции СС [1-3] в данном временном интервале представлена на рис. 6.

За постоянные спада каждой функции принимались усредненные значения на устойчивом участке. Такой участок выбирался из условия малого отклонения от среднего значения зависимостей $\alpha(t)$ и $\alpha_0(t)$ для каждой функции и при каждой реактивности. Усредненные значения постоянных спада α и α_0 приведены в табл. 1 и 2.

Таблица 1

Усредненные значения постоянных спада α по результатам обработки

$-\rho, \beta_{эфф}$	$\alpha, \text{ мкс}^{-1}$			
	АС [1]	АС [3]	СС [1-2]	СС [1-3]
0,98	1,13	1,12	1,10	1,13
1,45	1,41	1,35	1,33	1,41
1,95	1,64	1,64	1,61	1,67
2,40	1,94	1,93	1,93	1,93
2,93	2,23	2,23	2,17	2,20
3,27	2,36	2,39	2,36	2,37
4,00	2,79	2,82	2,67	2,77
5,20	3,46	3,41	3,46	3,41
6,14	3,97	4,04	3,97	3,98

Таблица 2

Усредненные значения постоянных спада α_0 по результатам обработки

$-\rho, \beta_{эфф}$	$\alpha_0, \text{ мкс}^{-1}$			
	АС [1]	АС [3]	СС [1-2]	СС [1-3]
0,98	0,57	0,57	0,56	0,57
1,45	0,58	0,55	0,54	0,58
1,95	0,56	0,56	0,55	0,57
2,4	0,57	0,57	0,57	0,57
2,93	0,57	0,57	0,55	0,56
3,27	0,55	0,56	0,55	0,55
4	0,56	0,56	0,53	0,55
5,2	0,56	0,55	0,56	0,55
6,14	0,56	0,57	0,56	0,57

По установленным значениям α были построены зависимости $\alpha(\rho)$.

На рис. 7 представлены зависимости $\alpha(\rho)$ рассматриваемых функций. Эти зависимости аппроксимированы линейной функцией вида $\alpha = \alpha_0(1 - \rho)$, где ρ – реактивность системы в $\beta_{эфф}$. Экстраполируя данную зависимость в точку ($\alpha = 0; \rho = 1$), были получены значения α_0^Γ для всех функций в точке пересечения графика с осью ординат. Сравнение постоянных спада, полученных экстраполяцией, и средних α_0^{C-K} , вычисленных для всех реактивностей по табл. 2, приведено в табл. 3.

Постоянные спада плотности мгновенных нейтронов при критичности на запаздывающих нейтронах рассматриваемых функций хорошо согласуются между собой. На основании экспериментальных данных была принята постоянная спада $\alpha_0^{эксп} = 0,56 \pm 0,01 \text{ мкс}^{-1}$.

Сравнение постоянных спада α_0

Корреляционная функция	АС [1]	АС [3]	СС [1–2]	СС [1–3]
α_0 по графику (α_0^r), мкс ⁻¹	0,56±0,01	0,57±0,01	0,55±0,01	0,56±0,01
α_0 по соотношению Симмонса – Кинга (α_0^{C-K}), мкс ⁻¹	0,56±0,01	0,56±0,01	0,55±0,01	0,56±0,01

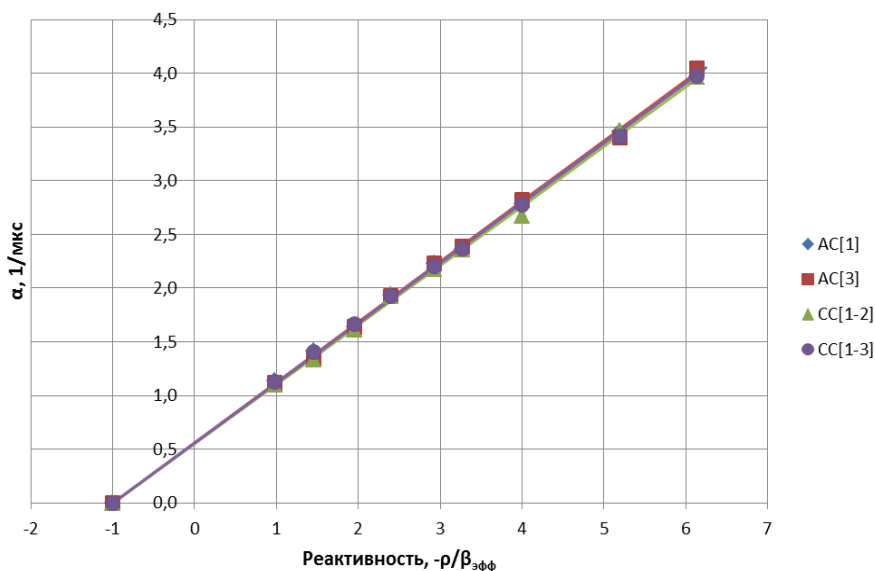
Рис. 7. Зависимость постоянной спада от реактивности $\alpha(\rho)$

Таблица 4

Сравнение расчетных и экспериментальных значений α_0

Способ определения постоянной спада	α_0 , мкс ⁻¹	
Расчет детализированной модели РС	БАС	0,50
	Jendl-4	0,54
	ENDF/B-8	0,52
Расчет упрощенной модели РС	БАС	0,51
	Jendl-4	0,57
	ENDF/B-8	0,55
Экспериментальные данные	$\alpha_0^{\text{экс}}$	0,56±0,01

Можно провести сравнение постоянной спада, полученной по результатам эксперимента и расчетным способом.

Расчетную постоянную спада можно получить, подставляя расчетные величины эффективной доли запаздывающих нейтронов $\beta_{\text{эфф}}$ и времени жизни мгновенных нейтронов τ в выражение

$$\alpha_0 = \frac{\beta_{\text{эфф}}}{\tau}. \quad (2)$$

Расчеты проводились с использованием различных библиотек ЯФК для упрощенной и детализированной моделей РС. Детализированная модель включает в себя описание геометрии и состава РС, осна-

стки и стэнда. Упрощенная модель описывает геометрию и состав только РС. Результаты расчетов и экспериментальные значения представлены в табл. 4.

Сравнение результатов расчетов между собой показывает, что использование упрощенной модели завышает значение постоянной спада для использованных библиотек ЯФК. Более высокое значение постоянной спада соответствует более быстрому спаду. Такое различие объясняется уменьшением количества отражающих и рассеивающих элементов оснастки.

Расчетные значения для детализированной модели занижены относительно экспериментальных данных. Наиболее близкое расчетное значение к экс-

периментальным данным дает использование библиотеки Jendl-4. Постоянная спада $\alpha_0 = 0,57 \pm \pm 0,01 \text{ мкс}^{-1}$, полученная ранее на комплексе ФКБН-2М [2] с использованием тех же деталей РС, совпадает с новыми данными в пределах погрешности.

Определение времени жизни мгновенных нейтронов

Используя полученные значения постоянных спада, можно определить время жизни мгновенных нейтронов τ для исследуемой РС. Для определения τ в этой работе использовались два подхода. Первый подход заключается в прямом нахождении времени жизни мгновенных нейтронов через соотношение (2).

Однако этот подход может вносить дополнительные систематические погрешности в определение τ из-за необходимости дополнительно определять значения эффективной доли запаздывающих нейтронов $\beta_{эфф}$ для конкретной конфигурации РС. Результаты данного подхода приведены в табл. 5. Время жизни мгновенных нейтронов рассчитывалось для ранее полученных значений α_0 .

Времена жизни мгновенных нейтронов, полученные из функций АС [1], АС [3], СС [1–3], согласуются между собой в пределах погрешностей. Время жизни, полученное для функции СС [1–2] несколько завышено относительно остальных корреляционных функций.

Второй подход заключается в нахождении отношения $\frac{\partial K_M / \partial H}{\partial \alpha / \partial H}$, где K_M – коэффициент размножения РС на мгновенных нейтронах, H – величина зазора между блоками РС. Данный подход основан на методе определения времени жизни, описанном в [8]. Разница заключается в расчете K_M без определения $\beta_{эфф}$. Это позволяет избавиться от дополнительных ошибок, связанных с расчетом $\beta_{эфф}$.

Значение $\partial K_M / \partial H$ не зависит от выбора библиотеки ядерно-физических констант и его можно принять постоянным для данного эксперимента. Поскольку $\alpha = \frac{K_M - 1}{\tau}$, то можно выразить время жизни мгновенных нейтронов через производные по величине зазора:

$$\alpha = \frac{K_M - 1}{\tau} \Rightarrow \frac{\partial \alpha}{\partial H} = \frac{1}{\tau} \cdot \frac{\partial K_M}{\partial H} \Rightarrow \tau = \frac{\partial K_M / \partial H}{\partial \alpha / \partial H}.$$

Важно отметить, что данное выражение можно использовать только для тех величин зазора между блоками, на которых наблюдается линейность зависимостей $\alpha(H)$ и $K_M(H)$. В данной работе линейность соблюдалась. Результаты обработки данным способом представлены в табл. 6.

Полученные времена жизни мгновенных нейтронов $\tau_{отн}$ из функций АС [1], АС [3] и СС [1–3] согласуются между собой. Время жизни мгновенных нейтронов, полученное для функции СС [1–2], несколько занижено относительно остальных корреляционных функций.

По полученным результатам было принято время жизни мгновенных нейтронов $\tau_{эсп} = 3,46 \pm 0,08 \text{ нс}$.

Можно провести сравнение времени жизни мгновенных нейтронов, полученных разными способами:

- расчеты детализированной и упрощенной модели с использованием различных библиотек ЯФК;
- определение через соотношение (2);
- определение через производные.

Результаты сравнений приведены в табл. 7.

Сравнение результатов расчетов между собой показывает, что использование упрощенной модели занижает значение времени жизни для использованных библиотек ЯФК.

Результаты экспериментов согласуются со временем жизни мгновенных нейтронов, полученным ранее на комплексе ФКБН-2М ($\tau = 3,42 \pm 0,09 \text{ нс}$),

Таблица 5

Время жизни мгновенных нейтронов при прямом вычислении

Корреляционная функция	АС [1]	АС [3]	СС [1–2]	СС [1–3]
τ по графику (τ_r), нс	3,40±0,06	3,39±0,06	3,44±0,06	3,41±0,06
τ по соотношению Симмонса – Кинга ($\tau_{С-К}$), нс	3,43±0,06	3,39±0,06	3,52±0,06	3,43±0,06

Таблица 6

Время жизни мгновенных нейтронов, определенное через отношение производных

Корреляционная функция	АС [1]	АС [3]	СС [1–2]	СС [1–3]
$\tau_{отн}$, нс	3,52±0,04	3,50±0,05	3,42±0,04	3,54±0,05

Сравнение времени жизни мгновенных нейтронов

Способ определения времени жизни		Время жизни, нс
Расчет детализированной модели РС	БАС	3,82
	Jendl-4	3,43
	ENDF/B-8	3,60
Расчет упрощенной модели РС	БАС	3,71
	Jendl-4	3,33
	ENDF/B-8	3,47
Экспериментальные данные	$\tau_{\text{эсп}}$	3,46±0,08

в пределах погрешности. Использование библиотеки Jendl-4 в расчете детализированной модели дает более согласованный с экспериментом результат.

Заключение

Для получения значений постоянной спада мгновенных нейтронов α_0 и времени жизни мгновенных нейтронов τ можно использовать различные подходы. Данные, полученные с использованием этих подходов, согласуются между собой в пределах погрешности. Это говорит о приемлемости использования каждого метода определения кинетических параметров. Совместное использование нескольких способов повышает уверенность в корректности полученных результатов.

Полученные в ходе работы значения постоянной спада мгновенных нейтронов α_0 и времени жизни мгновенных нейтронов τ согласуются с результатами, полученными ранее на комплексе ФКБН-2М [2] с использованием тех же деталей РС. В экспериментах на комплексе ФКБН-2М постоянная спада α_0 определялась из критерия линейности соотношения Симмонса – Кинга. Согласованность старых и новых экспериментальных данных показывает корректность подходов к обработке результатов экспериментов.

Время жизни мгновенных нейтронов, полученное в расчетах детализированной модели РС с использованием библиотек БАС и ENDF/B-8, несколько завышено относительно экспериментальных данных и результатов аналогичных расчетов с использованием библиотеки Jendl-4.

Результаты расчетов времени жизни для упрощенной модели РС занижены относительно детальных расчетов для всех библиотек ЯФК на 3–4 %. На ту же величину завышены расчетные значения постоянных спада. Расхождение объясняется отсутствием учета влияния нейтронов, рассеянных и отраженных от оснастки.

Список литературы

1. Панин А. В., Воронцов С. В., Девяткин А. А., Завьялов Н. В., Кувшинов М. И. История развития критмассовых экспериментов в РФЯЦ-ВНИИЭФ // Импульсные реакторы: история создания и перспективы использования. Тр. межотрасл. науч. конф. Т. 1. Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2016. С. 196–210.
2. Горелов В. П., Ильин В. И., Кайгородов А. А., Кувшинов М. И., Панин А. В., Пешехонов Д. П. Экспериментальные исследования кинетики мгновенных нейтронов в размножающих системах с активной зоной из плутония // ВАНТ. Сер. Физика ядерных реакторов. 2010. Вып. 2. С. 3–13.
3. International Handbook of Evaluated Criticality Safety Benchmark Experiments. Nuclear Energy Agency, Organization for Economic Cooperation and Development, NEA/NSC/DOC(95). Vol. 1. PU-MET-FAST-022. Evaluators (VNIIEF) Gorbatenko M. V., Gorelov V. P., Yegorov V. P., Zagrafov V. G., Zakharov A. N., Ilyin V. I., Kuvshinov M. I., Yuferev V. I., Malinkin A. A.
4. Mihalcz J. T., Mullens J. A., Mattingly J. K., Valentine T. E. Physical descriptions of nuclear materials identification system (NMIS) signatures // Nuclear Instruments and methods in Physics Research Section A. 2000. N 450. P. 531.
5. Sperr P., Spieler H., Marier M. R. A Simple Pulse-Shape Discrimination Circuit // Nuclear Instruments and Methods. 1974. Vol. 116. P. 55–59.
6. Казанский Ю. А., Матусевич Е. С. Экспериментальные методы физики реакторов. М.: Энергоатомиздат, 1984.
7. Simmons B. E., King J. S. F pulsed neutron technique for reactivity determination // Nucl. Sci. and Eng. 1958. Vol. 3, N 5. P. 595.
8. Бесов С. С., Ершова Л. С., Лукин А. В., Соколов Ю. А., Хмельницкий Д. В. Определение времени жизни мгновенных нейтронов в размножающих системах методом дифференцирования постоянной спада // ВАНТ. Сер. Физика ядерных реакторов. 2014. Вып. 3. С. 94–105.