

## ПРЕЦИЗИОННЫЕ ИНТЕГРАЛЬНЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТЫ С РАЗМНОЖАЮЩЕЙ СИСТЕМОЙ ИЗ ПЛУТОНИЯ И ОБЕДНЕННОГО УРАНА И ИХ ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

С. С. Бесов, А. А. Вайвод, Л. С. Ершова, А. В. Лукин, Д. А. Прокопьев,  
Ю. А. Соколов, П. Л. Тупицин, Д. В. Хмельницкий, А. А. Юдов

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИТФ», г. Снежинск Челябинской обл.

Представлено сравнение результатов критических и корреляционных экспериментов с размножающей системой из металлического плутония во всестороннем отражателе из обедненного урана с результатами их численного моделирования методом Монте-Карло по программам ПРИЗМА-Д и ПРИЗМА при использовании библиотек нейтронных констант ENDF-B6.8 и ENDF-B7.1.

**Ключевые слова:** критические и корреляционные эксперименты, критический зазор размножающей системы, асимптотическая постоянная спада, время жизни мгновенных нейтронов, библиотека нейтронных констант.

**PRECISE INTEGRAL EXPERIMENTS WITH ASSEMBLY OUT OF PLUTONIUM AND DEPLETED URANIUM AND NUMERICAL MODELING OF EXPERIMENTS / S. S. BESOV, A. A. VAIVOD, L. S. ERSHOVA, A. V. LUKIN, D. A. PROKOPYEV, YU. A. SOKOLOV, P. L. TUPITSYN, D. V. KHMELNITSKY, A. A. YUDOV** // The work presents the comparison of results for critical and correlation experiments with assembly out of metallic plutonium in all-round reflector out of depleted uranium with the results of their numerical modeling by Monte-Carlo method according to codes PRIZMA-D and PRIZMA using the libraries of neutron constants ENDF-B6.8 and ENDF-B7.1.

**Key words:** critical and correlation experiments, critical gap of assembly, asymptotical constant of decay, lifetime of prompt neutrons, library of neutron constants.

### Введение

На протяжении последних нескольких лет в РФЯЦ-ВНИИТФ проводятся критические и корреляционные эксперименты с размножающими системами, содержащими делящийся материал, для верификации нейтронных констант изотопов урана и плутония, применяемых при численном моделировании измерений с целью повышения точности рассчитываемых величин. Характеристиками, используемыми для сравнения результатов расчетов и экспериментов, являются:

– эффективный коэффициент размножения нейтронов для критического зазора  $H_{кр}$  между верхней и нижней частями размножающей системы;

– коэффициент  $\delta\alpha/\delta H$ , определяемый из зависимости асимптотической постоянной спада  $\alpha$  от зазора  $H$  размножающей системы вблизи состояния запаздывающей критичности (в области линейности данной зависимости). Отношение экспериментального значения коэффициента к расчетному характеризует различие расчетного и экспериментального

времени жизни мгновенных нейтронов  $\chi = \frac{\partial \alpha^{\text{Э}}}{\partial H} / \frac{\partial \alpha^{\text{Р}}}{\partial H} = \frac{\Lambda^{\text{Р}}}{\Lambda^{\text{Э}}} \frac{\partial K_{\text{эф}}^{\text{Э}}}{\partial H} / \frac{\partial K_{\text{эф}}^{\text{Р}}}{\partial H} \approx \frac{\Lambda^{\text{Р}}}{\Lambda^{\text{Э}}}$  при условии корректного расчета эффективного коэффициента размножения  $\left( \frac{\partial K_{\text{эф}}^{\text{Э}}}{\partial H} / \frac{\partial K_{\text{эф}}^{\text{Р}}}{\partial H} = 1 \right)$  [1].

Настоящая работа является продолжением начатых исследований [1–3]. С размножающей системой из металлического плутония во всестороннем отражателе из обедненного урана выполнены критические и корреляционные эксперименты. Также проведено их численное моделирование при использовании библиотек нейтронных констант ENDF-B6.8 и ENDF-B7.1 [4].

### Краткое описание и результаты экспериментов

Размножающая система (РС) собиралась на стенде для критмассовых измерений ФКБН-2 [5] с разбиением на нижнюю и верхнюю части. Сборка содержала десять дисков из  $\alpha$ -плутония (по пять в верхней и нижней частях), окруженных толстыми торцевыми (10–15 см) и боковым (10 см) отражателями из обедненного урана (рисунок). Верхняя часть системы собиралась на неподвижной стальной диафрагме, нижняя размещалась на подвижном штоке стенда.

Критмассовые эксперименты проводились при использовании двух «всеволновых» счетчиков типа Мак Киббена, которые регистрировали нейтроны, покидающие систему при различных зазорах между ее нижней и верхней частями. Экстраполяцией в ноль зависимостей обратного числа нейтронов утечки от зазора системы (интервал зазоров соответствовал значениям коэффициента умножения нейтронов  $\sim 100$ –500) для каждого детектора определялся критический зазор сборки. Среднее значение данной величины составило  $H_{\text{кр}} = 11,08 \pm 0,12$  мм ( $2\sigma$ ).

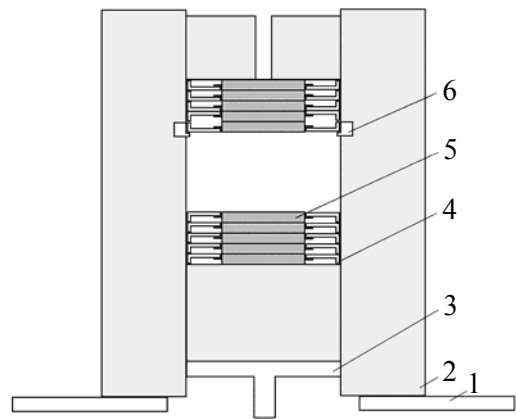


Схема размножающей системы на стенде ФКБН-2: 1 – стальная диафрагма; 2 – детали из обедненного урана; 3 – тарельчатая стальная подставка; 4 – алюминиевые центрирующие кольца; 5 – диски из  $\alpha$ -Pu; 6 – опорное кольцо-диафрагма из стали

Корреляционные эксперименты проводились с использованием аппаратно-программного комплекса NMIS [6], в состав которого входят набор сцинтилляционных детекторов, чувствительных к нейтронам и гамма-квантам, система формирования импульсов и ЭВМ со специально разработанной платой для набора и хранения данных. Источником нейтронов служил собственный фон плутония. Два детектора размером 9,5×9,5×10 см устанавливались симметрично по уровню диафрагмы РС на расстоянии 45 см от оси симметрии системы, третий такого же размера размещался на расстоянии 70 см от оси симметрии системы ниже уровня диафрагмы на 20 см. Для уменьшения вклада рассеянных окружением системы гамма-квантов детекторы упаковывались в свинцовые чехлы толщиной 9 мм. В процессе измерений для нескольких зазоров размножающей системы  $H_i$  ( $i > 20$ ) вблизи состояния запаздывающей критичности регистрировались потоки случайных событий – моменты времени, соответствующие актам взаимодействия нейтронов и гамма-квантов в детекторах. Путем обработки временных блоков (количество для обеспечения необходимой статистики достигало  $\sim 10^{10}$ ) в режиме реального времени рассчитывались временные автокорреляционные функции каналов детекторов («детектор 1 – детектор 1»),

«детектор 2 – детектор 2» и «детектор 3 – детектор 3»). На линейном (в полулогарифмическом масштабе) участке временных корреляционных функций для каждого зазора системы с использованием метода наименьших квадратов (МНК) вычислялись асимптотические постоянные спада  $\alpha_i$ . Для каждой автокорреляционной функции строилась зависи-

мость  $\alpha(H)$  и МНК рассчитывался коэффициент  $\delta\alpha/\delta H$  (табл. 1).

Из табл. 1 видно, что значения асимптотических постоянных спада, определенные по разным автокорреляционным функциям для системы с одним и тем же зазором, совпадают в пределах погрешности их определения. Также совпадают в пределах погрешности производные  $\delta\alpha/\delta H$ .

Таблица 1

*Значения  $\alpha$ , рассчитанные по автокорреляционным функциям каналов детекторов 1–3 на временном интервале  $0,5\alpha^{-1} \leq t \leq 2\alpha^{-1}$  [1], в зависимости от зазора размножающей системы. Погрешность МНК –  $\sigma_{\text{МНК}}$*

$H, \text{ мм}$	$\alpha, \text{ мкс}^{-1}$ ( $2\sigma_{\text{МНК}} \leq 0,02$ )		
	«детектор 1 – детектор 1»	«детектор 2 – детектор 2»	«детектор 3 – детектор 3»
11,40	0,28	0,28	0,27
11,48	0,31	0,31	0,30
11,48	0,31	0,30	0,29
11,55	0,34	0,33	0,32
11,60	0,35	0,35	0,34
11,65	0,38	0,38	0,37
11,70	0,40	0,40	0,39
11,75	0,42	0,41	0,40
11,80	0,44	0,44	0,43
11,85	0,46	0,45	0,44
11,95	0,51	0,51	0,50
12,02	0,52	0,52	0,51
12,12	0,58	0,57	0,56
12,22	0,61	0,61	0,59
12,31	0,65	0,65	0,64
12,40	0,69	0,69	0,68
12,52	0,73	0,72	0,72
12,60	0,78	0,77	0,75
12,62	0,79	0,77	0,78
12,70	0,81	0,80	0,80
12,80	0,84	0,83	0,82
12,88	0,88	0,88	0,87
12,98	0,92	0,91	0,89
$\delta\alpha/\delta H \pm 2\sigma_{\text{МНК}},$ $\text{мкс}^{-1} \cdot \text{мм}^{-1}$	$0,410 \pm 0,004$	$0,406 \pm 0,005$	$0,406 \pm 0,007$

## Результаты численного моделирования

Численное моделирование критических и корреляционных экспериментов проводилось по программам ПРИЗМА-Д [7] и ПРИЗМА [8] при использовании нейтронных констант ENDF-B6.8, ENDF-B7.1. По программе ПРИЗМА-Д рассчитывался эффективный коэффициент размножения нейтронов в состоянии запаздывающей критичности ( $H_{кр} = 11,08$  мм), по программе ПРИЗМА – число упругих рассеяний нейтронов в детекторе 1 для определения МНК асимптотических постоянных спада  $\alpha$ .

1. Результаты расчетов эффективного коэффициента размножения с учетом запаздывающих нейтронов  $K_{эф}$  для критического зазора РС приведены в табл. 2. Здесь же дана погрешность бенчмарк-модели, при оценке которой учитывались только те неопределенности системы, которые вносят наибольшие погрешности при расчете  $K_{эф}$ : зазор РС, содержание  $^{239}\text{Pu}$  и  $^{235}\text{U}$  в составах плутония и обедненного урана, соответственно, плотности делящихся материалов.

Из табл. 2 видно, что значения  $K_{эф}$ , полученные с библиотеками ENDF-B6.8 и ENDF-

B7.1, не совпадают с экспериментом ( $K_{эф} = 1$ ) в пределах оцененной погрешности бенчмарк-модели. Расчетные значения  $K_{эф}$  ниже экспериментальных: для библиотеки ENDF-B6.8 – на  $\sim 0,6-0,8\%$ , для библиотеки ENDF-B7.1 – на  $0,1-0,4\%$ .

2. Численное моделирование корреляционных измерений выполнено для значений зазора между верхней и нижней частями РС, соответствующих примерно такой же подкритичности РС, что и в эксперименте. При этом диапазон значений асимптотической постоянной спада  $\alpha$  примерно соответствовал экспериментальному.

Результаты расчетов асимптотической постоянной спада, определенной МНК по временным зависимостям числа упругих рассеяний нейтронов в детекторе 1, приведены в табл. 3. Временной интервал, на котором рассчитывались значения  $\alpha$ , для каждого зазора выбирался таким же, как в эксперименте,  $0,5\alpha^{-1} \leq t \leq 2\alpha^{-1}$ . Здесь же приведена величина

$$\chi = \frac{\partial \alpha^{\text{Э}}}{\partial H} / \frac{\partial \alpha^{\text{Р}}}{\partial H} \approx \frac{\Lambda^{\text{Р}}}{\Lambda^{\text{Э}}},$$

характеризующая погрешность расчета времени жизни мгновенных нейтронов.

Таблица 2

Результаты расчетов  $K_{эф}$  и погрешность бенчмарк-модели

Библиотека	$H_{кр}$ , мм	$K_{эф}$ ( $1\sigma < 0,01\%$ )	Погрешность модели – $2\sigma$
ENDF-B6.8	11,08	0,9932	$\sim 1,2 \cdot 10^{-3}$
ENDF-B7.1		0,9975	

Таблица 3

Результаты расчетов  $\alpha$  и коэффициента  $\delta\alpha/\delta H$ .

Погрешность МНК –  $\sigma_{МНК}$ , библиотека нейтронных констант ENDF-B7.1

$H$ , см	$\alpha$ ( $2\sigma_{МНК} < 0,1\%$ ), мкс $^{-1}$	$H$ , см	$\alpha$ ( $2\sigma_{МНК} < 0,1\%$ ), мкс $^{-1}$
1,08	0,262	1,206	0,749
1,098	0,339	1,224	0,814
1,116	0,409	1,242	0,878
1,134	0,478	1,26	0,939
1,152	0,547	$\delta\alpha/\delta H \pm 2\sigma_{МНК}$ , мкс $^{-1} \cdot \text{мм}^{-1}$	$0,376 \pm 0,007$
1,17	0,619	$\chi = \frac{(\partial\alpha/\partial H)^{\text{Э}}}{(\partial\alpha/\partial H)^{\text{Р}}} \pm 2\sigma$	$1,09 \pm 0,02$
1,188	0,682	–	–

Из табл. 3 видно, что погрешность расчета времени жизни мгновенных нейтронов для размножающей системы, состоящей из десяти плутониевых дисков, окруженных со всех сторон толстым (10–15 см) отражателем из обедненного урана, для библиотеки ENDF-B7.1 составляет ~9 %.

### Заключение

Для размножающей системы из десяти плутониевых дисков во всестороннем отражателе из обедненного урана толщиной 10–15 см выполнены интегральные эксперименты по измерению критического на запаздывающих нейтронах состояния ( $H_{кр}$ ) и коэффициента  $\delta\alpha/\delta H$ , отношение экспериментального значения которого к расчетному характеризует различие расчетного и экспериментального времени жизни мгновенных нейтронов 
$$\chi = \frac{\partial\alpha^{\mathcal{E}}}{\partial H} / \frac{\partial\alpha^P}{\partial H} \approx \frac{\Lambda^P}{\Lambda^{\mathcal{E}}}.$$

Расчеты эффективного коэффициента размножения  $K_{эф}$  в пределах оцененной погрешности бенчмарк-модели не совпали с экспериментом ( $K_{эф} = 1$ ): занижение для библиотеки ENDF-B6.8 составило ~0,6–0,8 %, для библиотеки ENDF-B7.1 ~0,1–0,4 %. Результаты численного моделирования корреляционных измерений показали точность расчета времени жизни мгновенных нейтронов с нейтронными константами из библиотеки ENDF-B7.1 на уровне 9 %.

### Список литературы

1. Бесов С. С., Ершова Л. С., Костенко И. И., Лукин А. В., Соколов Ю. А., Хатунцев К. Е., Хмельницкий Д. В. Оценка погрешности расчетов времени жизни мгновенных нейтронов в системе из металлического плутония // Атомная энергия, 2013, т. 114, вып. 3, с. 165–168.

2. Бесов С. С., Ершова Л. С., Костенко И. И., Лукин А. В., Самойлова Л. Ю., Соколов Ю. А., Хмельницкий Д. В. Верификация нейтронных констант по результатам нестационарных экс-

периментов с размножающими системами // Атомная энергия, 2011, т. 110, вып. 4, с. 231–236.

3. 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 // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Физика ядерных реакторов. 2014. Вып. 3: Импульсные реакторы и простые критические сборки, с. 94–105.

4. ENDF-102. Data Formats and Procedures for the Evaluated Nuclear Data File ENDF-6. Ed. V. McLane. – BNL-NCS-44945-01/04-Rev., 2001.

5. Леваков Б. Г., Лукин А. В., Магда Э. П., Погребов И. С., Снопков А. А., Терехин В. А. Импульсные ядерные реакторы РФЯЦ-ВНИИТФ. – Снежинск: Изд-во РФЯЦ-ВНИИТФ, 2002.

6. Mihalcz J., Mullens J., Mattingly J. et al. Physical description of nuclear materials identification system (NMIS) signatures. Nucl. Instrum. and Meth // Phys. Res. Section, 2000, vol. A 450, p. 531–535.

7. Кандиев Я. З., Зацепин О. В., Михалькова А. Г. и др. Возможности программы ПРИЗМА-Д // Исследования в гигантских импульсах тепловых нейтронов от импульсных реакторов и в ловушках больших ускорителей. – Дубна, 2005, с. 193–201.

8. Kandiev Y. Z., Kashaeva E. A., Khatuntsev K. E., Kuropatenko E. S., Lobanova L. V., Lukin G. V., Malakhov A. A., Malyshkin G. N., Modestov D. G., Mukhamadiev R. F., Orlov V. G., Samarin S. I., Serova E. V., Spirina S. G., Vakhonina T. V., Voronina N. A., Zatsepin O. V. «PRIZMA» Status // Annals of Nuclear Energy, 2015, vol. 82, p. 116–120.

Контактная информация –

Лукин Александр Васильевич,  
главный научный сотрудник  
РФЯЦ-ВНИИТФ,  
e-mail: dep5@vniitf.ru

Статья поступила в редакцию 20.06.18.

Вопросы атомной науки и техники. Сер. Физика ядерных реакторов, 2018, вып. 4, с. 97–101.