

УДК 621.039

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ПОДКРИТИЧЕСКОГО СТЕНДА “ЯЛІНА-ТЕПЛОВАЯ” С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ОБНОВЛЕННЫХ БИБЛИОТЕК ЯДЕРНЫХ ДАННЫХ

© 2020 г. Т. Н. Корбут¹, И. А. Едчик¹, А. В. Кузьмин¹, М. О. Кравченко¹, *

¹Государственное научное учреждение “Объединенный институт энергетических и ядерных исследований – Сосны”
Национальной академии наук Беларуси, Минск, Республика Беларусь

*E-mail: m.kravch@sosny.bas-net.by

Поступила в редакцию 11.05.2020 г.

После доработки 02.06.2020 г.

Принята к публикации 26.06.2020 г.

Представлен обзор текущих экспериментальных и расчетных исследований подкритического комплекса “Яліна”. Даны основные характеристики активной зоны установки “Яліна-Тепловая” и ее нейтронно-физические параметры. В рамках работы проведено компьютерное моделирование экспериментальной установки средствами нейтронно-физических Монте-Карло кодов MCU-PD и MCNP с использованием современных библиотек ядерных данных ENDF/b-VIII, JENDL 4.0 и JEFF 3.3, а также получены значения скоростей реакции трансмутации ^{129}I , ^{237}Np и ^{241}Am в экспериментальных каналах.

DOI: 10.31857/S0367676520100142

ВВЕДЕНИЕ

Проблема обращения с радиоактивными отходами в настоящее время приобретает особую актуальность в связи со значительным ростом ядерной энергетики в мировом производстве электроэнергии и с проблемами открытого ядерного топливного цикла (ЯТЦ).

Одним из перспективных направлений в решении проблемы накопления долгоживущих радиотоксичных продуктов деления ядерного топлива и младших актинидов – это использование реакций трансмутации. Задача превращения нежелательных радионуклидов в короткоживущие либо стабильные ядра решается на подкритических системах, управляемых ускорителями заряженных частиц высокой энергии (ADS-системы [1]). Преимуществом данной технологии является ее ядерная безопасность за счет эксплуатации в устойчивом подкритическом режиме.

Несмотря на значительную теоретическую базу не теряет актуальности проблема подбора оптимального для трансмутации спектра нейтронов. В теоретических работах отражены принципиальные аспекты технологий ADS-систем, однако до сих пор имеется дефицит экспериментальных исследований, посвященных изучению и развитию таких систем. Имеющиеся экспериментальные и теоретические данные также имеют определенные недо-

статки, связанные в том числе с недостаточной точностью данных сечений взаимодействий нейтронов в широком диапазоне энергий, которые использовались на момент проведения измерения и расчетов. С выходом обновленной библиотеки ядерных данных ENDF B/VIII [2], а также обновленных библиотек JENDL4.0 [3] и JEFF3.3 [4], данный вопрос получает новый виток исследований как экспериментальных, так и расчетных.

На базе “ОИЭЯИ–Сосны” НАН Беларуси организованы экспериментальные и теоретические исследования на подкритическом стенде “Яліна” – уран-полиэтиленовой сборки с внешним источником нейтронов (генератор нейтронов НГ-12-1 или изотопный источник ^{252}Cf). Проведенные ранее работы [5, 6] были направлены на определение нейтронно-физических характеристик активной зоны, распределения нейтронного поля и изучению скоростей ядерных реакций в экспериментальных каналах.

ПОДКРИТИЧЕСКИЙ СТЕНД “ЯЛІНА-ТЕПЛОВАЯ”

Исследовательская ядерная установка (ИЯУ) “Яліна” предназначена для изучения кинетики подкритических систем и возможности трансмутации долгоживущих радиоактивных продуктов деления в нейтронном поле таких систем.

ИЯУ “Яліна” включает в себя генератор нейтронов НГ-21-1, две подкритические сборки: “Яліна-Тепловая” и “Яліна-Бустер”, измерительный комплекс, системы контроля, жизнеобеспечения и физической защиты.

Обе подкритические сборки “Яліна-Тепловая” и “Яліна-Бустер” могут эксплуатироваться с урановым топливом различного состава и обогащения. Бустерная сборка позволяет получать высокоэнергетические и тепловые спектры нейтронов, в то время как “Яліна-Тепловая” — только тепловой спектр. Детальное описание обеих установок дано в отчете [7].

Генератор нейтронов НГ-12-1 представляет собой ускоритель ионов дейтерия с магнитной сепарацией ускоренного пучка и титан-третиевой или титан-дейтериевой мишенью. Тракт ускорения и транспортировки пучка расположен горизонтально относительно плоскости горизонта. Сепарация и вращения мишени позволяют значительно увеличивать срок службы мишени. Ионы дейтерия образуются в двухплазменном ионном источнике, формируются в пучок и ускоряются электрическим полем ускорительной трубки до энергии $E_d \sim 250$ кэВ. В некоторых случаях в экспериментах используется изотопный источник на основе ^{252}Cf .

РАСЧЕТНАЯ МОДЕЛЬ ПОДКРИТИЧЕСКОГО СТЕНДА “ЯЛІНА-ТЕПЛОВАЯ”

Расчетная модель стенда “Яліна-Тепловая” создавалась согласно описанию установки в [7] и новым данным, полученным от экспериментаторов. Все основные параметры активной зоны были в точности перенесены в модель без каких-либо упрощений, влияющих на конечный результат расчета. Отдельными расчетами показано, что наличие или отсутствие конструкционных материалов за границами отражателя не оказывает влияния на значения k_{eff} .

Расчетная модель создавалась для двух нейтронно-физических Монте-Карло кодов: MCU-PD (Montre-Carlo Universe) [8] и MCNP (Monte-Carlo Nuclear Particles) [9]. Обе модели для различных кодов в точности повторяли друг друга. Для получения актуальных результатов использовались обновленные библиотеки ядерных данных: для MCU-PD — ENDF B/VII [10], для MCNP — ENDF B/VIII [2], JEFF 3.3 [3] и JENDL 4.0 [4].

РАСЧЕТ ЭФФЕКТИВНОГО КОЭФФИЦИЕНТА РАЗМНОЖЕНИЯ НЕЙТРОНОВ И ДОЛИ ЗАПАЗДЫВАЮЩИХ НЕЙТРОНОВ

Согласно требованиям МАГАТЭ [11] подкритические экспериментальные установки должны

эксплуатироваться в режимах, когда значение k_{eff} не превышает 0.98, что позволяет поддерживать ядерную безопасность на необходимом уровне.

Важной проблемой обеспечения безопасности размножающих подкритических систем является контроль за изменением реактивности при работе в стационарном режиме, а также при перестройке активной зоны. Одним из способов контроля является непрерывное измерение некоторых параметров системы и определение подкритичности по известной связи измеряемых параметров с реактивностью установки. В частности, для систем с импульсным внешним источником нейтронов таким параметром может служить форма изменения величины потока нейтронов во времени внутри цикла импульсов.

Особенностью глубоко подкритической системы с импульсным внешним источником является сильное изменение во времени пространственной формы распределения нейтронного потока — от формы, обусловленной заданным распределением внешнего источника, до асимптотической формы, определяемой характеристикой самой системы.

Учитывая перечисленные выше факторы, контроль значения реактивности представляется довольно нетривиальной задачей. Следовательно, экспериментаторы должны оценить значение k_{eff} еще до начала натурных измерений. Для этих целей наиболее удобным и точным способом является Монте-Карло моделирование стационарной задачи распределения нейтронного потока.

Для определения значений k_{eff} и β_{eff} использовались нейтронно-физические коды MCU-PD [8] разработки НИЦ “Курчатовский институт” (РФ) и MCNP5 [9] разработки Лос-Аламосской национальной лаборатории (США).

Расчет значения k_{eff} экспериментальной модели дает среднюю величину $k_{eff} = 0.9600 \pm 0.0002$ (статистическая погрешность Монте-Карло расчета). Полученное значение согласуется с предыдущими работами [5, 6], но имеет лучшую сходимость за счет использования обновленных библиотек ядерных данных.

Анализ неопределенности расчета k_{eff} от неточности определения исходных параметров дает общую неопределенность эксперимента на уровне $\delta k_{eff} = 0.003$. Данный анализ проводился впервые для данной установки и был выполнен согласно рекомендациям [12]. Все исходные данные по средним значениям и отклонениям параметров эксперимента основываются на описании эксперимента [7], данных экспериментаторов и рекомендациям руководства [13]. В табл. 1 представлены соответствующие результаты анализа.

Анализ неопределенностей проводился для определения максимального отклонения расчетного значения k_{eff} при максимальном отклонении

Таблица 1. Данные анализа неопределенностей расчетного значения k_{eff} от неточности исходных параметров

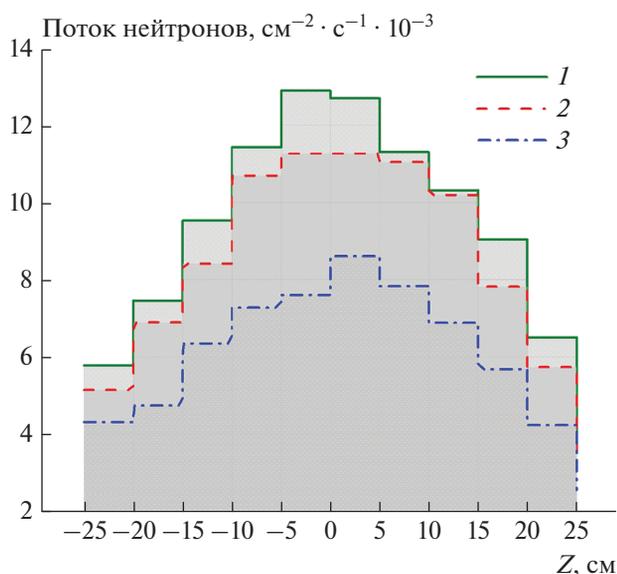
Параметр	Среднее значение	Стандартное отклонение	$\Delta k_{\delta x_i} / \delta x_i$	Δk_{eff}
Обогащение, %	10.0	0.0067	0.0599	$4.003 \cdot 10^{-4}$
Масса топлива, г	97.2	0.0087	0.0520	$4.509 \cdot 10^{-4}$
Высота топлива, см	50.0	0.0333	0.0070	$2.337 \cdot 10^{-4}$
Радиус топливного стержня, см	0.35	0.0289	0.0260	$7.523 \cdot 10^{-4}$
Толщина оболочки, см	0.15	0.0289	0.0470	$1.360 \cdot 10^{-3}$
Шаг размещения твэлов, см	2.0	0.1000	0.0106	$1.060 \cdot 10^{-3}$
Плотность замедлителя, г/см ³	0.923	0.0200	0.1433	$2.866 \cdot 10^{-3}$

Таблица 2. Расчетные значения k_{eff} компьютерной модели “Яліна-Тепловая”

	ENDF/b-VII.1	ENDF/b-VIII.0	JENDL 4.0	JEFF 3.3
MCU-PD	0.95474 ± 0.003	—	—	—
MCNP	—	0.96016 ± 0.003	0.95999 ± 0.003	0.95884 ± 0.003

параметров элементов конструкции активной зоны, определяющих её реактивность.

Расчеты проводились для различных библиотек ядерных данных [2–4, 10]. Все соответствующие результаты представлены в табл. 2. Экспериментальное среднее значение коэффициента размножения нейтронов, измеренное тремя методами, составляет $k_{eff} = 0.9569 \pm 0.0014$. Указанные в таблице погрешности соответствуют данным анализа неопределенностей, описанного выше.

**Рис. 1.** Пространственное распределение нейтронного потока в активной зоне (вдоль оси Z). 1, 2, 3 – номера экспериментальных каналов.

МОДЕЛИРОВАНИЕ НЕЙТРОННОГО ПОТОКА И СКОРОСТЕЙ РЕАКЦИЙ ТРАНСМУТАЦИИ МИНОР-АКТИНИДОВ

Изучение пространственного распределения нейтронного потока выполнялось с целью определения оптимальных условий трансмутации минор-актинилов. Для трех экспериментальных каналов подкритической сборки “Яліна-Тепловая”, расположенных параллельно распространению пучка нейтронов (вдоль оси Z) на расстояниях $R_1 = 5.09$ см, $R_2 = 11.4$ см и $R_3 = 17.5$ см от центра активной зоны, определялось распределение потока нейтронов вдоль оси Z . Соответствующие данные отображены на рис. 1. Заметна очевидная зависимость по спаду плотности потока нейтронов при продвижении от центра активной зоны к ее краям.

Наиболее нейтронно-напряженные зоны ожидаемо располагаются центральной части активной зоны и имеют характерный спад на периферии. Для центральных и периферийных областей экспериментальных каналов активной зоны проводились расчеты по определению формы спектра тепловых нейтронов. На рис. 2 представлены энергетическое распределение тепловой части спектра нейтронов для трех каналов.

Изучение трансмутации долгоживущих изотопов ^{129}I , ^{237}Np и ^{241}Am проводилась путем моделирования стационарной задачи распределения нейтронного потока и расчета скорости реакций захвата нейтронов (n, γ), (n, p), (n, α), ($n, 2n$) и (n, f). Данные изотопы были выбраны в первую очередь из-за их важности в области реакторной физики. Зоны регистрации в модели выбирались таким образом, чтобы соответствовать таковым в натур-

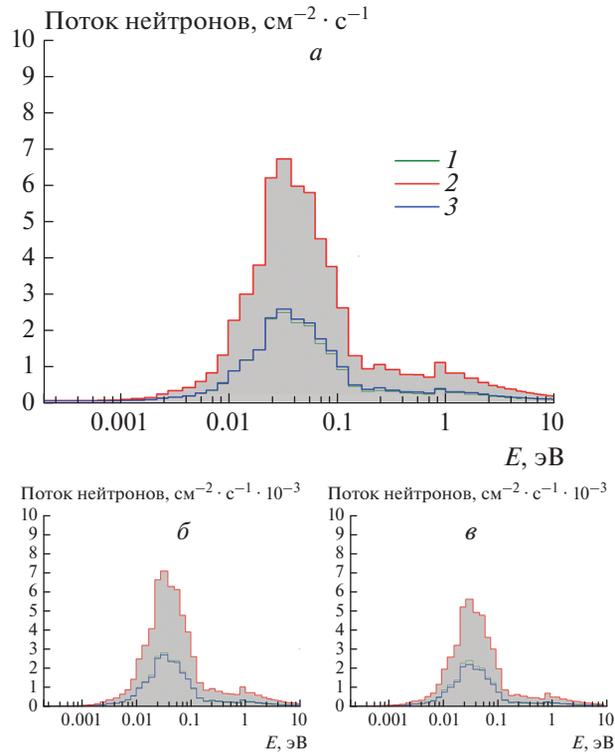


Рис. 2. Энергетическое распределение нейтронного потока в экспериментальных каналах. а, б, в – каналы 1, 2, 3 соответственно. 1: –25, 2: 0, 3: +25 см.

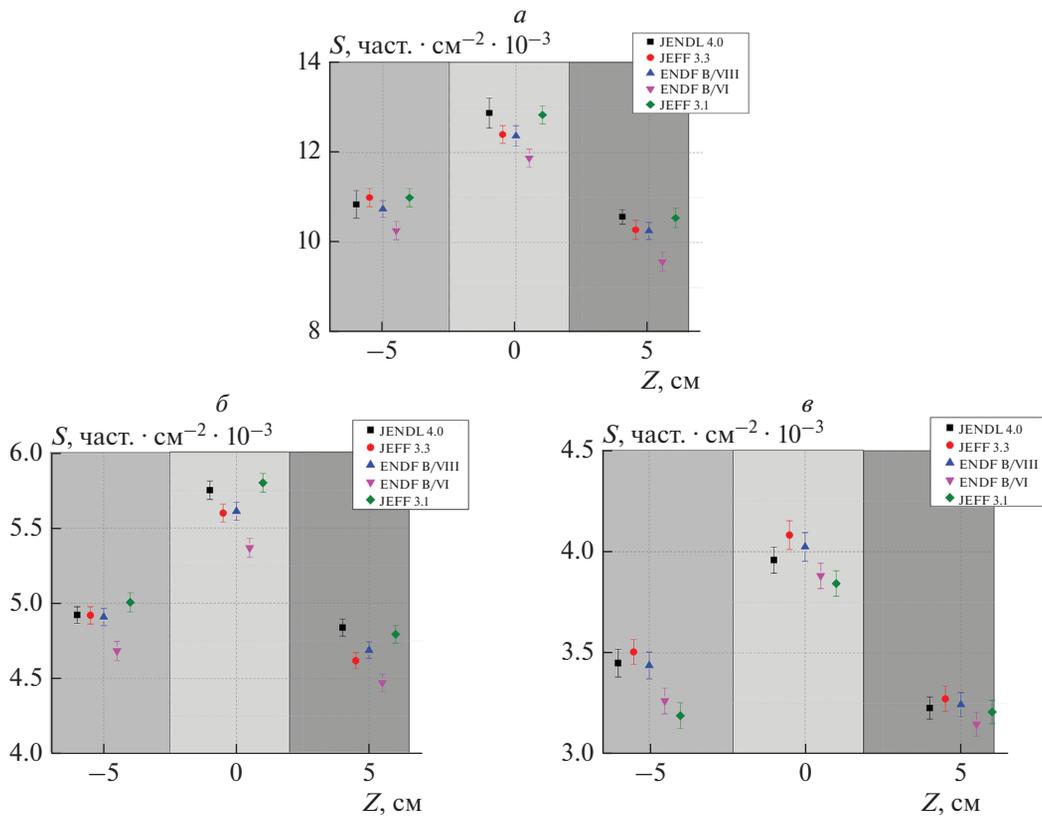


Рис. 3. Данные по скоростям реакции поглощения S в экспериментальном канале 1 для изотопов ^{129}I (а), ^{237}Np (б) и ^{241}Am (в). Квадраты соответствуют библиотеке ядерных данных JENDL 4.0, круги – JEFF 3.3, треугольники – ENDF B/VIII, опрокинутые треугольники – ENDF B/VI, ромбы – JEFF 3.1.

ном эксперименте. Все расчеты проводились как с применением новых и обновленных библиотек ядерных данных [2–4], так и с применением их прошлых версий для сравнения. Результаты моделирования и расчетов приведены на рис. 3. Нормировка расчетных данных проводилась на один единичный нейтрон источника.

Можно заметить, что расхождение между результатами расчета с помощью различных библиотек не велико. Так как на данном этапе работы исследования по изучению неопределенностей расчета скоростей реакций не проводились (за исключением учета статистической погрешности Монте-Карло расчета), дальнейшее изучение вопроса должно включать восстановление областей перекрытия результатов, представленных на рис. 3.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Подкритический комплекс “Яліна” позволяет проводить многочисленные исследования в области изучения ADS-систем и процессов трансмутации элементов. Главной целью данной работы является моделирование экспериментов на подкритической сборке “Яліна-Тепловая” современными Монте-Карло кодами MCU-PD и MCNP, расчет основных нейтронно-физических характеристик (k_{eff} , потоки и спектры нейтронов, скорости реакций) с применением новых и обновленных библиотек ядерных данных (ENDF B/VII, ENDF B/VIII, JEFF 3.3 и JENDL 4.0), и оценка погрешностей и неопределенностей расчета k_{eff} .

Построенная компьютерная модель полностью согласуется с текущим состоянием эксперимента,

что обеспечивает полное расчетное сопровождением проводимых исследований. С учетом применения актуальных библиотек ядерных данных, ценность проводимых экспериментальных и расчетных исследований очевидна. Дальнейшие работы направлены на получение необходимых данных для дальнейшего изучения и развития ADS-систем и подкритических реакторов в целом.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. IAEA-TecDoc-1821. IAEA, 2017.
2. *Brown D., Chadwick M., Capote R. et al.* // Nucl. Data Sheets. 2018. V. 148. P. 1.
3. *Shibata K., Iwamoto O., Nakagawa T. et al.* // J. Nucl. Sci. Technol. 2011. V. 48. P. 1.
4. *Cabellos O., Alvarez-Velarde F., Angelone M. et al.* // EPJ Web Conf. 2017. V. 146. Art № 06004.
5. *Kiyavitskaya H., Fokov Y.* // Prob. Atomic Sci. Technol. Ser. Thermonucl. Fusion. 2015. V. 38. P. 53.
6. *Beresneva V.A., Korbut T.N., Korneyev S.V.* // Phys. At. Nucl. 2018. V. 81. P. 1441.
7. *Talamo A., Gohar Y., Kiyavitskaya H. et al.* // Nucl. Technology. 2013. V. 184. P. 131.
8. *Kalugin M.A., Oleynik D.S., Shkarovsky D.A.* // Proc. of the SNA+MC2013 (Paris, 2013). Art. № 06012.
9. *X-5 Monte Carlo Team* // Los Alamos Nucl. Lab., 2008.
10. *Chadwick M.B., Herman M., Obložinský P. et al.* // Nucl. Data Sheets. 2011. V. 112. P. 2887.
11. Safety of research reactors. Number SSR-3 in specific safety requirements. IAEA, 2016.
12. *Poullot G., Doutriaux D., Anno J.* Guide to the expression of uncertainties for the evaluation of critical experiments, 2008. 94 p.
13. J.C. for guides in metrology. Tech. Rep. JCGM, 2008.