

АНАЛИЗ БЕНЧМАРК-ЭКСПЕРИМЕНТОВ С БЫСТРЫМ СПЕКТРОМ НЕЙТРОНОВ И МОДЕЛЕЙ РБН С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ РАЗЛИЧНЫХ БИБЛИОТЕК ОЦЕНЕННЫХ НЕЙТРОННЫХ ДАННЫХ

О.Н. Андрианова, Ю.Е. Головки, Г.М. Жердев, Г.Б. Ломаков, Е.С. Теплухина

*АО «ГНЦ РФ-ФЭИ им. А.И. Лейпунского»
249033 Калужская обл., г. Обнинск, пл. Бондаренко, 1*



Представлены результаты сравнительного анализа расчетов критичности с использованием кода, реализующего метод Монте-Карло, с групповыми константами БНАБ-93 и БНАБ-РФ, а также файлами оцененных нейтронных данных отечественной библиотеки РОСФОНД и зарубежных библиотек (ENDF, JENDL, JEFF) разных лет. Анализировался набор интегральных экспериментов на сборках БФС, выполненных в разные годы в ГНЦ РФ-ФЭИ (60 различных критических компоновок). Рассмотренные интегральные эксперименты включены в базу оцененных экспериментальных нейтронно-физических данных, предназначенную для обоснования нейтронно-физических характеристик реакторов на быстрых нейтронах (РБН) с натриевым и свинцовым теплоносителями, верификации расчетных кодов и констант, оценки константной составляющей погрешности характеристик РБН. Показано, что библиотекой, минимизирующей расчетно-экспериментальные расхождения для рассмотренного набора интегральных экспериментов, является библиотека РОСФОНД. Приводятся результаты расчета критичности для моделей РБН с натриевым и свинцовым теплоносителями по различным библиотекам оцененных нейтронных данных и дана оценка константной составляющей расчетной погрешности. По результатам выполненного анализа делается заключение о направлениях дальнейшего развития отечественного константного обеспечения расчетов РБН.

Ключевые слова: интегральные эксперименты, БФС, ENDF, JENDL, JEFF, РОСФОНД, БНАБ-РФ, база данных интегральных экспериментов, реакторы на быстрых нейтронах.

ВВЕДЕНИЕ

Проблеме уточнения нейтронных данных для изотопов, играющих определяющую роль в достижении целевого уровня точности расчетного предсказания нейтронно-физических характеристик реакторов Поколения IV, уделяется значительное внимание. Наиболее значимые усилия были реализованы в рамках международного проекта CIELO (Collaborative International Evaluated Library Organisation) [1]. Результатом проекта стали новые версии американской библиотеки ENDF/B-VIII (релиз 2018 г.) [2] и европей-

© О.Н. Андрианова, Ю.Е. Головки, Г.М. Жердев, Г.Б. Ломаков, Е.С. Теплухина, 2021

кой библиотеки JEFF-3.3 [3] (релиз конца 2017 г.). Эти версии библиотек стали очередным этапом процесса регулярного обновления национальных библиотек оцененных ядерных данных, который в каждой стране происходит с разной интенсивностью и учетом национальных приоритетов в области реакторостроения.

Лидером в области обновления оцененных нейтронных данных являются США, где каждые пять – семь лет выходит новая версия библиотеки ENDF (ENDF/B-V.2 (1994 г.), ENDF/B-VI.8 (2001 г.), ENDF/B-VII.0 (2006 г.), ENDF/B-VII.1 (2011 г.), ENDF/B-VIII.0 (2018 г.)) [4].

Официальная общедоступная версия национальной библиотеки оцененных нейтронных данных РОСФОНД [5] датируется 2010 г. (под библиотекой РОСФОНД в работе понимается официальный релиз библиотеки, размещенный в открытом доступе на сайте ГНЦ РФ-ФЭИ <https://www.ippe.ru/reactors/reactor-constants-datacenter/rosfond-neutron-database>). Эта версия библиотеки прошла детальную апробацию, и на ее основе создаются локальные версии библиотеки под частные задачи и проекты. Файлы библиотеки РОСФОНД составлены из данных, отобранных из файлов национальных библиотек БРОНД-2.2 (1992 г.) и ФОНД-2 (1993 г.), а также зарубежных оценок ядерных данных библиотек ENDF/B, JEFF, JENDL и CENDL. Библиотека РОСФОНД формировалась при критическом анализе аналогичных зарубежных библиотек того же временного периода, которые за прошедшие девять лет претерпели несколько этапов обновления. Несмотря на то, что библиотека РОСФОНД неоднократно тестировалась на различных расчетных и экспериментальных бенчмарках, она устойчиво демонстрирует хорошие результаты по сравнению с зарубежными аналогами. Тем не менее, практика ее использования (или ее групповой версии БНАБ-РФ [6], проходящая стадию внедрения в расчеты реакторов на быстрых нейтронах и защиты на предприятиях отрасли) при проведении нейтронно-физических расчетов в России не является повсеместной. Несмотря на вполне очевидные преимущества использования актуального константного обеспечения наибольшее распространение для нейтронно-физических расчетов реакторов на быстрых нейтронах (БН, БРЕСТ, СВБР, МБИР и др.) и процессов в объектах замкнутого ядерного топливного цикла (ЗЯТЦ) в РФ получила групповая библиотека БНАБ-93 (релиз 1993 г.) [7]. Система констант БНАБ-93 была составлена на основе оцененных нейтронных данных библиотеки ФОНД-2 в 1993 г. с учетом опыта расчетного анализа интегральных экспериментов на критических сборках. Такая инерционность в области внедрения и использования усовершенствованного константного обеспечения для нейтронно-физических расчетов не способствует развитию национального константного обеспечения и поэтому темп, с которым движутся страны-лидеры в этой области, остается недостижимым в РФ.

Одним из факторов, сдерживающих внедрение актуальных версий библиотек, является опасение обнаружить расхождения в расчетах реакторных характеристик, выполненных по актуальной библиотеке нейтронных данных и на основе библиотеки-предшественника. В то же время в самом факте возможности наблюдения таких различий нет ничего удивительного, о чем свидетельствует анализ зарубежного опыта внедрения обновленных версий библиотек оцененных нейтронных данных, в процессе которого демонстрируются и обсуждаются причины возможных расхождений.

Поскольку сравнение предсказательной способности и эффективности обновленных версий библиотек нейтронных констант проводится путем сопоставления результатов расчетов характеристик критическихборок с экспериментальными данными, то для дальнейшего развития работ по верификации константного обеспечения РОСФОНД/БНАБ-РФ в работе сопоставлены показатели эффективности расчетно-

го описания совокупного набора экспериментальных данных, полученных на стендах БФС-1, -2, выполненные с использованием различных версий отечественных (РОСФОНД, БНАБ-РФ и БНАБ-93) и зарубежных библиотек нейтронных данных (ENDF, JENDL и JEFF) разных лет (ENDF/B-V.2 (США, 1994 г.), ENDF/B-VII.1(США, 2011 г.) и ENDF/B-VIII (США, 2018 г.), JEFF-3.2 (Европа, 2014 г.), JEFF-3.3 (Европа, 2017 г.) и JENDL-4.0u2 (Япония, 2012)) [8]. Для демонстрации расхождений в расчетах критичности для моделей РБН с натриевым и свинцовым теплоносителями, выполненных по различным библиотекам оцененных нейтронных данных, в работе представлены результаты сравнительных расчетов критичности для трех моделей РБН с различными теплоносителями и типами топлива, а также приведены оценки константной составляющей расчетной погрешности.

КРАТКОЕ ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТОВ НА КРИТИЧЕСКИХ СБОРКАХ БФС

Результаты интегральных экспериментов во всем мире используются для оценки и повышения точности расчетных предсказаний проектируемых реакторных установок и систем топливного цикла, планирования новых экспериментов, оценки эффективности экспериментальных программ и т.д. [9, 10]. Совершенствование константного и программного обеспечения расчетного сопровождения проектируемых и действующих энергетических и исследовательских реакторов основано на расчетном анализе данных по экспериментам на критических сборках БФС. Экспериментальные программы исследований на сборках БФС охватывают такие направления исследований, как изучение нейтронно-физических характеристик быстрых реакторов с натриевым и свинцовым теплоносителями, тепловых реакторов с МОКС-топливом, минимальных критических масс при производстве МОКС топлива, ядерной безопасности систем захоронения ядерных отходов и т.д. В рамках международного проекта по созданию базы экспериментов по критической безопасности (ICSBEP) [11] и реакторных экспериментов (IRPhEP) [12] часть экспериментов, выполненных в разные годы на стендах БФС-1,-2, были детально описаны. В общей сложности в международные справочники IRPhEP и ICSBEP вошло восемь оценок бенчмарк-экспериментов, выполненных примерно на 30-ти видах конфигураций активных зон критических стендов.

В таблице 1 приведены краткие характеристики 60-ти рассмотренных конфигураций активных зон, собранных на стендах БФС-1,-2 в период с 1974 по 2009 гг. В основном, все активные зоны рассмотренных критических сборок были сформированы из смешанного уран-плутониевого топлива и имели быстрый и промежуточный спектры нейтронов. Исключением является серия сборок БФС-57 и БФС-59, которые моделировали различные компоновки топлива для легководяных реакторов.

Для систематизации накопленной информации и обеспечения возможности ее использования для целей тестирования и корректировки файлов оцененных ядерных данных, верификации расчетных кодов, оценки точности расчетных предсказаний нейтронно-физических характеристик РБН инициирована работа по формированию информационной базы по интегральным экспериментам на критических сборках БФС. Данная база предназначена для дополнения существующих информационных и программных инструментов сопровождения экспериментальных программ на стендах БФС [9].

РАСЧЕТЫ КРИТИЧЕСКИХ СБОРОК БФС

Расчеты критичностиборок БФС из табл. 1 были выполнены с использованием кода, реализующего метод Монте-Карло [13, 14], с групповыми константами БНАБ-93 и БНАБ-РФ, а также файлами оцененных нейтронных данных отечественной библиотеки РОСФОНД и версий разных лет зарубежных библиотек (ENDF, JENDL, JEFF).

Перечень конфигурации критических сборок БФС

Год	Сборка	Стенд	Материалы	Модель
Быстрый реактор с натриевым теплоносителем [9]				
1990	58-1 (1)*	БФС-2	Pu/УO ₂ /Na/ инертный разбавитель (UO ₂)	БН-800
1993	66-1 (1)		Pu/УO ₂ /Na (UO ₂ /Na ₂)	БН-600
	66-Б (9)	Pu/U(d)/C/Na/ (UO ₂ /Fe/Cr/Ni)		
1996	72 (2)	БФС-1	U(d)/UO ₂ /Pu/Al ₂ O ₃ /Na (UO ₂)	БН-800
			U(90)/UO ₂ /ZrH/Na (UO ₂)	
1997	73 (1)		U/Na (UO ₂ /Na)	KALIMER
1998	78 (1)		Pu/УO ₂ /Na (UO ₂ /Na ₂)	БН-800
Быстрый реактор с тяжелым жидкометаллическим теплоносителем				
1991	61-1(3)	БФС-1	Pu/U(d)/C/Pb/Al (Pb/UO ₂)	РБН со свинцовым теплоносителем
1999	77 (2)		Pu/U(d)/UO ₂ /C/Pb (UO ₂)	
2000	64-1 (3)	БФС-2	Pu/U(d)/C/Pb (PbBi)	
Водородосодержащие материалы [11]				
2004-2005	97 (4)	БФС-1	Pu/УO ₂ (UO ₂)	Изготовление МОКС-топлива
2008-2009	99 (3)		Pu/УO ₂ /CH ₂ (UO ₂)	
	101 (4)			
Системы захоронения ядерных отходов [11]				
1999	79 (5)	БФС-1	U/Si/CH ₂	Захоронение отходов
1999	81 (6)		Pu/Si/CH ₂	
Различные топливные композиции [11]				
1974	31(2)	БФС-2	Pu/УO ₂	ЗЯТЦ
1976	33 (3)		UO ₂ /U(90)O ₂	
1976	35 (3)		U(d)/U(36)/U(90)	
1977	38 (2)		Pu/U(d)	
1980	42 (1)		Pu/УO ₂ /CH ₂	
1985	49 (2)		Pu/УO ₂ /CH ₂	
Тепловые реакторы [12]				
1989	57 (1)	БФС-1	U(36)O ₂ /UO ₂ /CH ₂ /Al (UO ₂)	Модели тепловых реакторов
1990	59 (1)		Pu/УO ₂ /CH ₂ /Al (UO ₂)	
*) в скобках указано число критических конфигураций				

Поскольку компоновки активных зон критических сборок имеют гетерогенную структуру и представляют собой чередование слоев различных материалов толщиной от 0,3 до 100 мм, то при расчетах в групповом приближении необходимо учитывать гетерогенную резонансную самоэкранировку сечений. Расчеты по библиотекам БНАБ-93 и БНАБ-РФ выполнялись с использованием подгруппового представления сечений в области разрешенных резонансов для изотопов ²³⁸U, ²³⁹Pu, Fe и факторов самоэкранировки сечений для остальных изотопов и для ²³⁸U, ²³⁹Pu, Fe в области неразрешенных резонансов. При этом поправки в факторы самоэкранировки вычислялись из принципа эквивалентности однородных и гетерогенных сред. Подробно методика расчета критических сборок с использованием кодов Монте-Карло в групповом приближении описана в работе [15].

На основе расчетно-экспериментальных расхождений для различных версий оте-

чественных и зарубежных библиотек был выполнен статистический анализ, позволяющий сделать выводы о точности расчетов и эффективности описания данной системой констант L набора из N интегральных экспериментов.

Таблица 2

Средние отклонения расчетных коэффициентов размножения от эксперимента

Спектр нейтронов	Быстрый			Промежуточный			Все		
	Δ	δ	μ	Δ	δ	μ	Δ	δ	μ
РОСФОНД	-0.21	0.31	1.12	0.13	0.83	2.09	-0.10	0.54	1.53
ENDF/B-VII	-0.27	0.53	1.51	0.23	1.00	2.51	-0.09	0.72	1.92
ENDF/B-VIII	-0.22	0.40	1.31	0.37	0.88	2.70	-0.02	0.60	1.91
ENDF/B-V	-0.29	0.82	2.39	0.47	1.16	3.00	-0.03	0.94	2.61
JEFF 3.2	-0.18	0.41	1.47	0.30	0.85	2.46	-0.01	0.59	1.87
JEFF 3.3	-0.15	0.35	1.22	0.26	0.83	2.14	-0.02	0.55	1.76
JENDL-4.0	-0.02	0.47	1.11	0.46	0.87	2.34	0.15	0.63	1.64
БНАБ-93	-0.09	0.63	1.98	0.30	1.12	2.87	0.05	0.83	2.33

В таблице 2 приведены значения следующих величин, которые могут рассматриваться в качестве показателей эффективности для сопоставления библиотек [16, 17].

1. Среднее значение отклонения расчетных коэффициентов размножения от экспериментальных величин, выраженное в процентах:

$$\langle \Delta \rangle^L = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \left(\frac{P_n^L}{\mathcal{E}_n} - 1 \right) \cdot 100,$$

где P_n^L – расчетное значение, полученное по библиотеке L для сборки n , отнесенное к \mathcal{E}_n – экспериментальному значению.

2. Среднеквадратичное отклонение расчетно-экспериментальных отношений для коэффициентов размножения, выраженное в процентах:

$$\langle \delta \rangle^L = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{n=1}^N (\Delta_n^L - \langle \Delta \rangle^L)^2},$$

где $\Delta_n^L = (P_n^L / \mathcal{E}_n - 1)$ – расчетно-экспериментальное отклонение в процентах, полученное по библиотеке L для сборки n .

3. Среднее по набору из N интегральных экспериментов число стандартных отклонений между экспериментом и расчетом критичности для системы констант:

$$\mu^L = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \left[\left(\frac{P_n^L - \mathcal{E}_n}{\mathcal{E}_n} \cdot 100 \right)^2 \cdot \frac{1}{(\delta_{\mathcal{E}_n}^L)^2 + \delta_{pn}^2} \right]},$$

где $\delta_{\mathcal{E}}$ – относительное значение экспериментальной погрешности, %; δ_p – относительное значение расчетной (статистической) погрешности, % [18].

Все значения показателей эффективности в табл. 2 вычислены для трех категорий: сборки с быстрым спектром нейтронов, сборки с промежуточным спектром нейтронов и сборки с быстрым и промежуточным спектрами нейтронов. В строках с 3 по 10 перечислены библиотеки, с использованием которых были выполнены расчеты $k_{эф}$ сборок БФС. Данные по показателям эффективности не приводятся для библиотеки БНАБ-РФ, поскольку они совпадают с данными библиотеки РОСФОНД

(табл. 2, строка 3).

Таблица 3

Средние отклонения расчетных коэффициентов размножения при переходе от библиотеки РОСФОНД к другим библиотекам

	P/P _{РОСФОНД} - 1, %	
	Среднее	Максимум
БНАБ-РФ	0.11	0.34
ENDF/B-VII	0.23	0.86
ENDF/B-VIII	0.33	0.66
ENDF/B-V	0.66	2.35
JEFF 3.2	0.26	0.70
JEFF 3.3	0.24	0.84
JENDL-4.0	0.39	0.90
БНАБ-93	0.44	1.66

В таблице 3 приведены максимальное и среднее значения в процентах отношения величины критичности, вычисленной по библиотеке $L(P_n^L)$, к величине критичности, рассчитанной по библиотеке РОСФОНД ($P_n^{РОСФОНД}$):

$$\Delta P_{РОСФОНД}^L = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \left| \frac{P_n^L}{P_n^{РОСФОНД}} - 1 \right| \cdot 100.$$

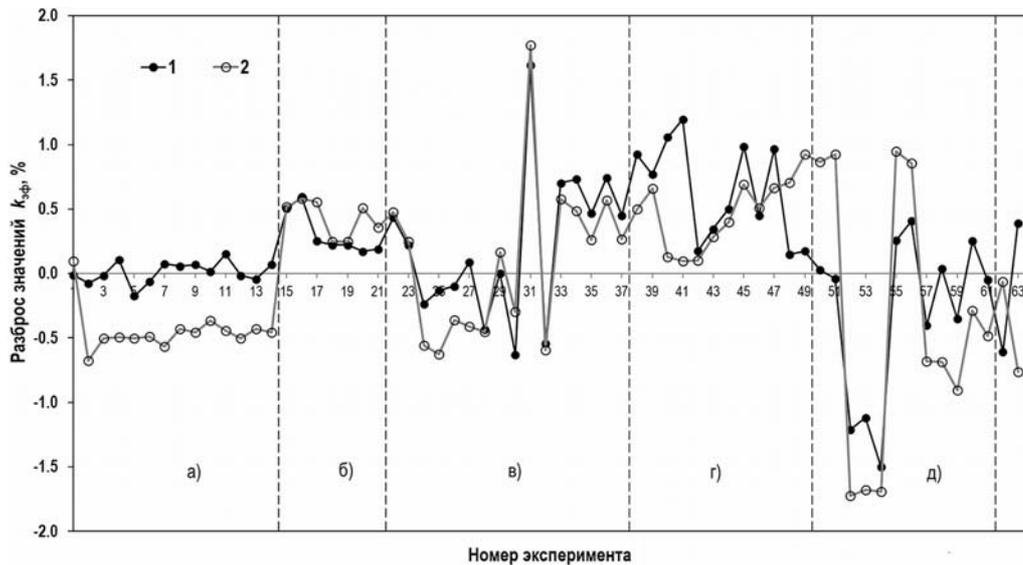


Рис. 1. Отклонения в расчетных значениях критичности, обусловленные переходом от старой версии библиотеки к новой: 1) величина $(P_{БНАБ-93}/P_{БНАБ-РФ} - 1)$ в процентах; 2) величина $(P_{ENDF/B-V}/P_{ENDF/B-VIII} - 1)$ в процентах. Области, выделенные штрихами: а) РБН с натриевым теплоносителем; б) РБН со свинцовым теплоносителем; в) изготовление МОКС-топлива; г) захоронение отходов в песке; д) системы ЗЯТЦ

На рисунке 1 показаны отклонения значений критичности в процентах при переходе от старой версии библиотеки к новой. Черными отрезками, соединяющими черные маркеры, показано отношение расчета $k_{эф}$ по БНАБ-93 к расчету по БНАБ-РФ, а серыми, соединяющими светлые маркеры, – отношение расчета $k_{эф}$ по ENDF/B-V к расчету по ENDF/B-VIII. Диапазон характерных спектров нейтронов в рассмотренных сборках весьма широк. Вертикальными штрихами отмечены области, соответствующие ти-

пам экспериментальных конфигураций, перечисленных в табл. 1.

На рисунке 2 приведены данные по максимальному и минимальному значениям величины отклонений в расчетах по различным библиотекам – $(P^i/P^j - 1) \cdot 100$ в процентах, где i и j – индекс библиотеки согласно табл. 2 (ENDF, JENDL, JEFF и РОСФОНД).

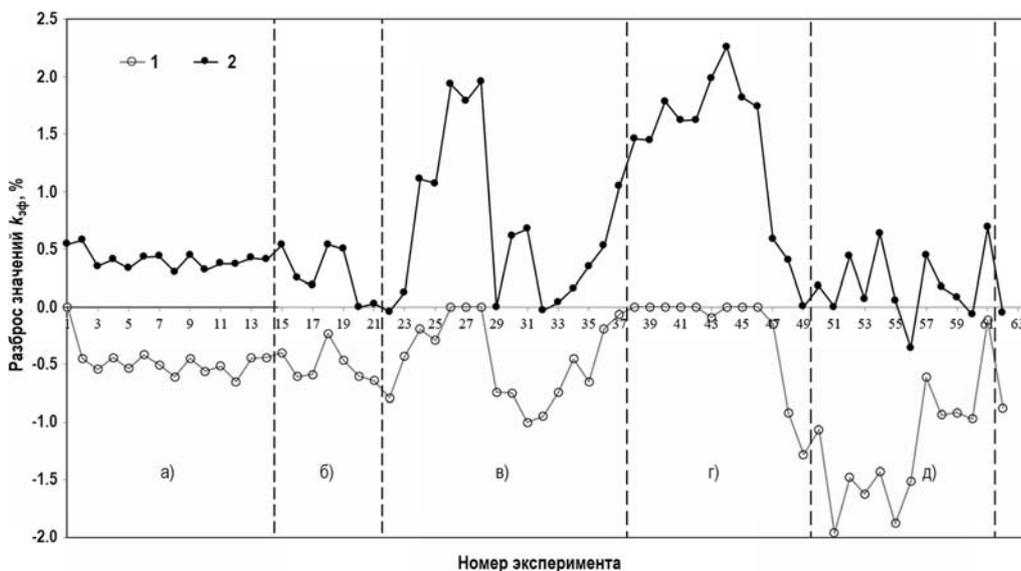


Рис. 2. Значение величины отклонений в расчетах по различным библиотекам $(P^i/P^j - 1)$ в процентах: 1) минимальное, 2) максимальное. Области, выделенные штрихами: а) РБН с натриевым теплоносителем; б) РБН со свинцовым теплоносителем; в) изготовление МОКС-топлива; г) захоронение отходов в песке; д) системы ЗЯТЦ

РАСЧЕТЫ КРИТИЧНОСТИ МОДЕЛЕЙ РБН

В таблице 4 приводятся данные по отклонениям расчетных значений $k_{эф}$ в процентах для реакторов типа БН с оксидным и нитридным топливом, а также быстрого реактора со свинцовым теплоносителем. Отклонения значений $k_{эф}$ вычислены как отношение расчета $k_{эф}$ по перечисленным в столбце 1 библиотекам к расчету $k_{эф}$, выполненному с использованием библиотеки, указанной в столбце 2. Расчеты $k_{эф}$ моделей РБН выполнены при температурах материалов, соответствующих рабочему состоянию реакторной установки.

Таблица 4

Отклонения в расчетах $k_{эф}$ моделей РБН, связанные с использованием различных библиотек оцененных нейтронных данных ($P^1/P^2 - 1$, %)

Библиотека		РБН-1 (Na+МОКС)	РБН-2 (Na+нитрид)	РБН-3 (Pb+нитрид)
P1	P2	P1/P2- 1, %		
БНАБ-93	БНАБ-РФ	0,09	0,52	0,89
ENDF/B-V	ENDF/B-VIII	0,04	0,47	0,82
ENDF/B-VII		0,18	0,21	-0,05
ENDF/B-VIII		-0,07	-0,03	-0,05
JEFF3.3		0,95	0,99	0,78
JEFF3.2	JEFF3.3	0,23	0,24	0,03

На основе ковариационных матриц погрешностей сечений и коэффициентов чувствительности $k_{эф}$ к изменению сечений вычислены погрешности расчета $k_{эф}$ моде-

лей РБН, которые составили 1,9% для реакторов с натриевым теплоносителем и 2,0% для реакторов со свинцовым теплоносителем.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

На основании анализа результатов статистической обработки расчетов $k_{эф}$ всей совокупности сборок БФС можно сделать следующие выводы.

Современное отечественное константное обеспечение позволяет выполнять расчеты критических сборок БФС с сильной гетерогенностью по кодам, реализующим метод Монте-Карло, с высокой точностью. Переход от библиотеки РОСФОНД к ее групповой версии БНАБ-РФ для рассмотренных критических конфигураций БФС приводит к отклонению расчетов $k_{эф}$, равному $\sim 0,1\%$ (см. табл. 3).

Переход от библиотеки БНАБ-93 к БНАБ-РФ приводит к повышению точности расчетного предсказания $k_{эф}$ сборок БФС как с быстрым, так и промежуточным спектром нейтронов. В среднем в полтора – два раза сократились расчетно-экспериментальные расхождения; при этом значения расчетов критичности изменились в среднем не более чем на 0,44%. Максимальное отклонение расчетов $k_{эф}$ до 2% наблюдается для сборок с промежуточным спектром нейтронов и плутониевым топливом. Величина максимального отклонения не превышает константной погрешности для систем с промежуточным спектром нейтронов, которая изменяется в пределах от 2 до 3% в зависимости от состава сборки.

Переход от библиотеки БНАБ-93 (1993 г.) к БНАБ-РФ (2010 г.) приводит к отклонениям результатов расчетов критичности быстрых реакторов с нитридным топливом от 0,5 до 0,9%. При этом разброс в расчетных значениях $k_{эф}$, полученных по новейшим зарубежным библиотекам 2017 – 2018 гг., не менее $\sim 1\%$.

Переход от библиотек JEFF3.3 и ENDF/B-VIII версий 2010 – 2011 гг. к версиям 2017 – 2018 гг. не выявил значительного повышения точности расчетного описания сборок БФС и значительных отклонений в расчетах $k_{эф}$ для моделей РБН. Однако, если сравнивать отклонения в расчетах $k_{эф}$ сборок БФС (см. рис. 1) при переходе от библиотек ENDF/B-V.2 (1994 г.) к ENDF/B-VIII (2018 г.), то они аналогичны отклонениям результатов, наблюдаемым при переходе от версии групповой библиотеки БНАБ-93 (1993 г.) к версии БНАБ-РФ (2010 г.).

Наблюдаемый разброс в расчетных значениях $k_{эф}$ для сборок БФС и моделей РБН, обусловленный использованием различных библиотек нейтронных данных, не превышает константной погрешности расчетов, обусловленной погрешностью данных по нейтронным сечениям.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представленные в работе результаты расчетно-экспериментального анализа совокупности экспериментов на критических стендах БФС позволяют сделать следующие выводы.

Результаты расчетов $k_{эф}$, выполненных с использованием библиотеки РОСФОНД, могут отличаться от результатов, полученных по некоторым версиям зарубежных библиотек, примерно на 1%. При этом различия между расчетными значениями $k_{эф}$, полученными с использованием зарубежных библиотек JEFF 3.3 и ENDF/B-VIII, также находятся на уровне $\sim 1\%$. Если сравнивать разные версии одной и той же зарубежной библиотеки, например, ENDF/B-V.2 (1994 г.) и ENDF/B-VIII (2018 г.), то наблюдаются аналогичные отклонения в результатах «расчет-эксперимент», что и при переходе от версии групповой библиотеки БНАБ-93 (1993 г.) к версии БНАБ-РФ (2010 г.). Для всей совокупности рассмотренных экспериментов показано снижение расчетно-экспериментальных расхождений при использовании актуальных

версий библиотек оцененных ядерных данных по сравнению с результатами, полученными на основе более ранних версий соответствующих библиотек.

Литература

1. *Chadwick M.B., Capote R., Trkov A. et al.* CIELO Collaboration Summary Results: International Evaluations of Neutron Reactions on Uranium, Plutonium, Iron, Oxygen and Hydrogen. // Nucl. Data Sheets. – 2018. – Vol. 148. – PP. 189-213.
2. *Brown A., Chadwick M. B., Capote R., et al.* ENDF/B-VIII.0: The 8th Major Release of the Nuclear Reaction Data Library with CIELO-project Cross Sections, New Standards and Thermal Scattering Data. // Nucl. Data Sheets. – 2018. – Vol. 148. – PP. 1-142.
3. JEFF-3.3 – Joint Evaluated Fission and Fusion File. Электронный ресурс: <http://www.oecd-nea.org/dbdata/jeff/jeff33/> (дата доступа 10.03.2020).
4. Evaluated Nuclear Data File (ENDF) Database Version of 2019-10-24. Электронный ресурс: <http://www.nds.iaea.org/exfor/endf.htm> (дата доступа 20.02.2020).
5. *Забродская С.В., Игнатюк А.В., Кошечев В.Н., Манохин В.Н., Николаев М.Н., Проняев В.Г.* РОСФОНД – российская национальная библиотека оцененных нейтронных данных. // ВАНТ. Серия: Ядерные константы. – 2007. – № 1-2. – С. 3-21.
6. *Кошечев В.Н., Мантуров Г.Н., Николаев М.Н., Цибуля А.М.* Библиотека групповых констант БНАБ-РФ для расчетов реакторов и защиты. // Известия высших учебных заведений. Ядерная энергетика. – 2014. – № 3. – С. 93-101.
7. *Мантуров Г.Н., Николаев М.Н., Цибуля А.М.* Система групповых констант БНАБ-93. Часть 1: Ядерные константы для расчета нейтронных и фотонных полей излучений. // ВАНТ. Серия: Ядерные константы. – 1996. – Вып. 1. – С. 59.
8. *Shibata K., Iwamoto O., Nakagawa T. et al.* JENDL-4.0: A New Library for Nuclear Science and Engineering. // J. Nucl. Sci. Technol. – 2011. – Vol. 48. – No. 1 – PP. 1–30.
9. *Андреанова О.Н., Дулин В.А., Михайлова И.В., Андреанов А.А.* Расчетно-экспериментальный анализ скорости реакций Pu, Np, Am, Cm на критических стендах БФС. // Атомная энергия. – 2017. – Т. 122. – Вып 5. – С. 243-248.
10. *Андреанова О.Н., Дулин В.А., Дулин В.В., Андреанов А.А.* Влияние особенностей резонансной структуры ²³⁵U на расчетные характеристики критических сборок БФС со смягченным спектром нейтронов. // Атомная энергия. – 2016. – Т. 121. – Вып 2. – С. 107-113.
11. ICSBER – International Handbook of Evaluated Criticality Safety Benchmark Experiments. Электронный ресурс: <https://www.oecd-ea.org/science/wpncs/icsber/handbook.html> (дата доступа 20.02.2020).
12. IRPhEP – International Reactor Physics Experiments Evaluation Project. Электронный ресурс: <https://www.oecd-nea.org/science/wprs/irphe/> (дата доступа 10.03.2020).
13. *Блыскавка А.А., Мантуров Г.Н., Николаев М.Н., Цибуля А.М.* Программный комплекс CONSYST/ММККЕНО для расчета ядерных реакторов методом Монте-Карло в многогрупповом приближении с индикатрисами рассеяния в P_n-приближении: Препринт ФЭИ-2887. – Обнинск: ГНЦ РФ-ФЭИ, 2001. – 28 с.
14. *Жердев Г.М., Кислицина Т.С., Николаев М.Н.* Система комбинированных констант РОКОКО – Современное состояние, результаты тестирования с геометрическим модулем ММК. // Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2018. – № 2. – С. 47-57. DOI: <https://doi.org/10.26583/npe.2018.2.05>.
15. *Андреанова О.Н., Жердев Г.М., Мантуров Г.Н., Теплухина Е.С.* Некоторые особенности расчета критическихборок с использованием кодов Монте-Карло в групповом и детальном представлении нейтронных сечений. Препринт ФЭИ-3288. – Обнинск: ГНЦ РФ-ФЭИ, 2019. – 24 с.
16. *Андреанова О.Н., Жердев Г.М., Ломаков Г.Б., Мантуров Г.Н., Теплухина Е.С.* Учет гетерогенных эффектов при подготовке многогрупповых нейтронных констант в системе CONSYST/БНАБ-РФ. // Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2019. – № 4. – С. 58-70. DOI: <https://doi.org/10.26583/npe.2019.4.05>.

17. Головки Ю.Е., Кошечев В.Н., Мантуров Г.Н., Цибуля А.М. Применение метода наименьших квадратов для оценки константной погрешности расчетов критичности систем с плутонием. // Ядерная физика и инжиниринг. – 2014. – Т. 5. – № 4. – С. 293-300.

18. Усачев Л.Н., Бобков Ю.Г. Последовательное планирование интегральных экспериментов и эффективный метод подгонки констант с учетом коррекции погрешностей совокупности микроскопических измерений. / Сб. «Ядерные константы». – М.: Атомиздат, 1972. – Вып. 10. – 88 с.

Поступила в редакцию 16.03.2020 г.

Авторы

Андрианова Ольга Николаевна, с.н.с., к.т.н.

E-mail: o.n.andrianova@yandex.ru

Головки Юрий Евгеньевич, с.н.с., к.т.н.

E-mail: sherrygy@rambler.ru

Жердев Геннадий Михайлович, ведущий научный сотрудник, канд. физ.-мат. наук

E-mail: zherdev@obninsk.ru

Ломаков Глеб Борисович, научный сотрудник, канд. техн. наук

E-mail: gleb.lomakov@gmail.com

Теплухина Евгения Сергеевна, младший научный сотрудник

E-mail: ev.s.teplukhina@mail.ru

UDC 621.039.51.17

CALCULATION AND EXPERIMENTAL ANALYSIS OF INTEGRAL EXPERIMENTS WITH FAST NEUTRON SPECTRUM AND MODELS OF SODIUM- AND LEAD-COOLED FAST REACTORS BASED ON DIFFERENT EVALUATED NUCLEAR DATA LIBRARIES

Andrianova O.N., Golovko Yu.E., Zherdev G.M., Lomakov G.B.,

Teplukhina Ye.S.

JSC «SSC RF-IPPE n.a. A.I. Leypunsky»

1 Bondarenko Sq., 249033 Obninsk, Kaluga Reg., Russia

ABSTRACT

The paper deals with a comparative analysis of criticality calculations using a Monte-Carlo neutronic code and the BNAB-93 and BNAB-RF multi-group nuclear data libraries as well as evaluated neutron data files from the Russian ROSFOND library and foreign libraries (ENDF, JENDL, JEFF) of different years. The object of analysis was a set of integral experiments on BFS facilities performed in different years at the Institute of Physics and Power Engineering (60 different critical configurations). The considered integral experiments are included in the base of evaluated experimental neutron-physical data, intended to substantiate the neutronic characteristics of fast reactors (FR) with sodium and lead coolants, to verify the neutronic codes nuclear data, and to estimate the nuclear data component of the uncertainties associated with neutronic parameters of fast reactors. It is shown that the ROSFOND evaluated nuclear data library is a library that minimizes the calculation and experimental discrepancies for the considered set of integral experiments. The authors also present the results

of calculating the criticality for the models of fast reactors with sodium and lead coolants based on various libraries of evaluated neutron data and give an estimate of the nuclear data component of the calculated uncertainties. Based on the results of the analysis, a conclusion is made on the directions of further development of Russian nuclear data for fast reactor neutronics calculations.

Key words: integral experiments, BFS, ENDF, JENDL, JEFF, ROSFOND, ABBN, database of integral experiments, fast neutron reactors.

REFERENCES

1. Chadwick M.B., Capote R., Trkov A. et al. CIELO Collaboration Summary Results: International Evaluations of Neutron Reactions on Uranium, Plutonium, Iron, Oxygen and Hydrogen. *Nucl. Data Sheets*. 2018, v. 148, pp. 189-213.
2. Brown A., Chadwick M. B., Capote R., et al. ENDF/B-VIII.0: The 8th Major Release of the Nuclear Reaction Data Library with CIELO-project Cross Sections, New Standards and Thermal Scattering Data. *Nucl. Data Sheets*. 2018, v. 148, pp. 1-142.
3. JEFF-3.3 – Joint Evaluated Fission and Fusion File. Available at: <http://www.oecd-nea.org/dbdata/jeff/jeff33/> (accessed Mar. 10, 2020).
4. Evaluated Nuclear Data File (ENDF) Database Version of 2019-10-24. Available at: <http://www.nds.iaea.org/exfor/endl.htm> (accessed Feb. 20, 2020).
5. Zabrodsкая S.V., Ignatyuk A.V., Koscheev V.N., Manokhin V.N., Nikolaev M.N., Pronyaev V.G. ROSFOND – Russian National Library of Estimated Neutron Data. *VANT. Ser. Yadernye Konstanty*. 2007, no. 1-2, pp. 3-21 (in Russian).
6. Koshcheev V.N., Manturov G.N., Nikolaev M.N., Tsibulya A.M. Library of group constants of BNAB-RF for reactor calculations and protection. *Izvestia Vysshikh Uchebnykh Zawedeniy. Yadernaya Energetika*. 2014, no. 3, pp. 93-101 (in Russian).
7. Manturov G.N., Nikolaev M.N., Tsibulya A.M. BNAB-93 Group Data Library. Part 1: Nuclear Data for Calculation of Neutron and Photon Radiation Fields. *VANT. Ser. Yadernye Konstanty*. 1996, v. 1, p. 59 (in Russian).
8. Shibata K., Iwamoto O., Nakagawa T. et al. JENDL-4.0: A New Library for Nuclear Science and Engineering. *J. Nucl. Sci. Technol*, 2011, v. 48, no 1, pp. 1-30.
9. Andrianova O.N., Dulin V.A., Mikhailova I.V., Andrianov A.A. Calculation and Experimental Analysis of Pu, Np, Am, Cm Reaction Rates at Critical BFS Stations. *Atomnaya Energiya*. 2017, v. 122, iss. 5, pp. 243-248 (in Russian).
10. Andrianova O.N., Dulin V.A., Dulin V.V., Andrianov A.A. Influence of peculiarities of ²³⁵U resonance structure on calculated characteristics of critical BFS assemblies with softened neutron spectrum. *Atomnaya Energiya*. 2016, v. 121, iss. 2, pp. 107-113 (in Russian).
11. ICSBEP – International Handbook of Evaluated Criticality Safety Benchmark Experiments. Available at: <https://www.oecd-ea.org/science/wpncs/icsbep/handbook.html> (accessed Mar. 10, 2020).
12. IRPhEP – International Reactor Physics Experiments Evaluation Project. Available at: <https://www.oecd-nea.org/science/wprs/irphe/> (accessed Mar. 10, 2020).
13. Blyskavka A.A., Manturov G.N., Nikolaev M.N., Tsibulya A.M. *Program Complex CON-SYST/MKKENO for Calculation of Nuclear Reactors by Monte Carlo Method in Multigroup Approximation with Scattering Indicatives in Pn-approximation*: Preprint FEI-2887. Obninsk. SSC RF-PEI Publ., 2001, 28 p. (in Russian).
14. Zherdev G.M., Kislitsina T.S., Nikolaev M.N. The System of Combined Constants ROKOKO – Current State, Results of Testing with the MMK Geometric Module. *Izvestia vuzov. Yadernaya Energetika*. 2018, no. 2, pp. 47-57. DOI: <https://doi.org/10.26583/npe.2018.2.05> (in Russian).
15. Andrianova O.N., Zherdev G.M., Manturov G.N., Teplukhina E.S. *Some Features of Critical Assemblies Calculation Using Monte Carlo Codes in Group and Detailed Representation of Neutron Sections*. Preprint FEI-3288. Obninsk. SSCRF-FEI Publ., 2019, 24 p. (in Russian).

16. Andrianova O.N., Zherdev G.M., Lomakov G.B. Manturov G.N., Teplukhina E.S. Accounting for Heterogeneous Effects in the Preparation of Multigroup Neutron Constants in CONSYST/BNAB-RF. *Izvestia vuzov. Yadernaya Energetika*. 2019, no. 4, pp. 58-70. DOI: <https://doi.org/10.26583/npe.2019.4.05> (in Russian).

17. Golovko Yu.E., Koscheev V.N., Manturov G.N., Tsibulya A.M. Application of the Least Squares Method for Estimation of Constant Error in Calculations of Criticality of Systems with Plutonium. *Yadernaya Fizika i Inzhiniring*. 2014, v. 5, no. 4, pp. 293-300 (in Russian).

18. Usachev L., Bobkov Yu. *Planning on Optimum Set of Microscopic Experiments and Evaluations to obtain a Given Accuracy in Reactor Parameter Calculations*, INDC CCP-19U. Viena. IAEA Int. Nucl. Data Committee, 1972, 88 p.

Authors

Andrianova Olga Nikolaevna, Senior Researcher, Cand. Sci. (Nuclear Engineering)

E-mail: o.n.andrianova@yandex.ru

Golovko Yury Evgenievich, Senior Researcher, Cand. Sci. (Nuclear Engineering)

E-mail: sherrygy@rambler.ru

Zherdev Gennady Mikhailovitch, Leading Researcher, Cand. Sci. (Phys. – Math.)

E-mail: zherdev@obninsk.ru

Lomakov Gleb Borisovich, Researcher, Cand. Sci. (Engineering)

E-mail: gleb.lomakov@gmail.com

Teplukhina Eugenia Sergeevna, Junior Researcher

E-mail: ev.s.teplukhina@mail.ru