

ВЕРИФИКАЦИЯ КОНСТАНТНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ РОСФОНД/БНАБ-РФ В РАСЧЕТАХ МЕЖДУНАРОДНОГО ТЕСТА OECD/NEA ПО КРИТИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТИ СИСТЕМ С МОКС-ТОПЛИВОМ

О.Н. Андрианова, Ю.Е. Головки, Г.Н. Мантуров

АО «ГНЦ РФ-ФЭИ им. А.И. Лейпунского»

249033 Россия, г. Обнинск, Калужская обл., пл. Бондаренко, 1



Представлены результаты расчетного анализа бенчмарк-теста OECD/NEA по оценке точности параметров критической безопасности размножающих систем с МОКС-топливом. Расчетный тест представляет собой набор из 15-ти шарообразных размножающих систем, различающихся характеристиками состава и геометрии. По условиям теста значения $k_{эфф}$ анализируемых систем заранее неизвестны. В рамках расчетного анализа теста с использованием национальных кодов и библиотек ядерных данных требуется наравне с расчетом $k_{эфф}$ также оценить априорную (обусловленную точностью используемых ядерных данных) и апостериорную (с учетом накопленной экспериментальной информации) погрешности расчета $k_{эфф}$. На основании бенчмарк-теста протестирована обновленная версия константного обеспечения РОСФОНД/БНАБ-РФ. Приведены результаты оценки априорной и апостериорной погрешностей $k_{эфф}$ с использованием системы ИНДЭКС для предложенных тестовых моделей. На основании анализа результатов расчетов показано, что 1) наблюдаемый разброс в значениях $k_{эфф}$, полученных с использованием российской библиотеки РОСФОНД и зарубежных библиотек оцененных ядерных данных (ENDF/B-VII.0, JEFF-3.2, JENDL-4.0), варьируется в пределах от -0.3 до 0.8%; 2) отклонения результатов расчетов в значениях $k_{эфф}$, полученных по библиотеке РОСФОНД и ее групповой версии БНАБ-РФ, не превышают 0.1%. Среднее для всех тестовых вариантов размножающих систем значение априорной погрешности расчета $k_{эфф}$ составило порядка 1%, а с учетом отобранного набора экспериментальных данных по критичности систем с МОКС-топливом, включающих в себя эксперименты на стендах БФС, средняя апостериорная погрешность $k_{эфф}$ снижается до 0.3%. Выполненные оценки подтверждают высокую точность константного обеспечения РОСФОНД/БНАБ-РФ для расчетов параметров критической безопасности размножающих систем с МОКС-топливом.

Ключевые слова: МОКС-топливо, интегральные эксперименты, стенд БФС, оценка точности, эффективный коэффициент размножения, константная погрешность, тест OECD/NEA, метод максимального правдоподобия.

ВВЕДЕНИЕ

Следуя основной цели Агентства по ядерной энергии Организации экономического сотрудничества и развития (OECD/NEA) – способствовать безопасному развитию атомной энергетики в мирных целях в странах-участницах посредством международного научно-технического сотрудничества – в рамках различных экспертных и рабочих групп агентства наряду с активностью по сбору, анализу и совершенствованию констант, расчетных методик, программ, баз экспериментальных данных, значительное внимание уделяется разработке и расчетному анализу различных бенчмарк-тестов [1]. Подобного рода бенчмарк-тесты представляют собой наиболее эффективное средство тестирования специализированных национальных кодов и констант.

Вопросы ядерной и критической безопасности в OECD/NEA рассматриваются в рамках экспертной группы по обоснованию критической безопасности – WPNCs (Working Party on Nuclear Criticality Safety), в рамках которой выделена отдельная рабочая группа по анализу неопределенностей в задачах оценки параметров критической безопасности – EGUACSA (Expert Group on Uncertainty Analysis for Criticality Safety Assessment) [2].

Экспертам EGUACSA был предложен «слепой» расчетный бенчмарк-тест по оценке погрешностей расчета эффективного коэффициента размножения нейтронов $k_{\text{эфф}}$ (значения $k_{\text{эфф}}$ анализируемых систем заранее неизвестны) для упрощенных моделей систем внешнего топливного цикла с МОКС-топливом, позволяющий протестировать национальные расчетные коды и константное обеспечение, используемые как для обоснования критической безопасности проектируемых реакторных установок, так и систем внешнего топливного цикла. В рамках теста также были поставлены задачи по оценке точности расчетных предсказаний, снижению величины априорной погрешности за счет привлечения результатов ранее проведенных интегральных и реакторно-физических экспериментов, корректировке ядерных констант.

На основе данного бенчмарк-теста в АО «ГНЦ РФ-ФЭИ им. А.И. Лейпунского» выполнен цикл исследований по верификации константного обеспечения РОСФОНД/БНАБ-РФ [3, 4] и валидации программно-методической базы системы кодов и архивов данных ИНДЕКС [5, 6]. В систему ИНДЕКС включены ковариационные данные ядерных констант БНАБ [7] и программы статистического анализа расчетно-экспериментальных результатов, что позволяет выполнять количественную оценку как априорной (за счет имеющихся неопределенностей в ядерных константах), так и апостериорной (на основании привлечения информации из архивов экспериментальных данных) погрешностей расчета $k_{\text{эфф}}$.

СПЕЦИФИКАЦИЯ БЕНЧМАРК-ТЕСТА ПО КРИТИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТИ

Предложенный расчетный тест представляет собой упрощенные модели систем внешнего топливного цикла с МОКС-топливом, имеющие простую сферическую геометрию (рис. 1). Шары делящегося материала различных диаметров (от 15 до 52.5 см), состоящие из разных по составу топливных композиций (смеси урана, плутония и воды) с плотностями 3.5, 5.5 и 4.6 г/см³, окружены водным отражателем фиксированной толщины (20 см). Рассматриваемые размножающие системы относятся к типу систем с промежуточным спектром нейтронов.

Соотношения четно-нечетных изотопов плутония (^{239}Pu , ^{240}Pu , ^{241}Pu , ^{242}Pu) для предложенных топливных композиций (плутониевый вектор) соответствуют плутониевому вектору МОКС-топлива, используемому в реакторных установках типа SFR и LWR. Такая постановка задачи обусловлена интересом к изучению вопроса о влиянии ядерных свойств и характеристик плутония при изменении плутониевого вектора в топливных композициях PuO_2 , а также замедляющих свойств воды на величину критической мас-

сы. В таблице 1 приведены основные характеристики размножающих систем бенчмарк-теста. В соответствующих колонках таблицы указаны: 1 – условные названия размножающих систем, 2 – влажность топлива (отношение массы воды к массе топлива), 3 – радиус центральной части сферы, показанной на рис. 1, заполненной смесью МОКС-топлива и воды, 4 – содержание PuO_2 в топливе, 5 – 8 – относительные доли изотопов плутония.



Рис. 1. Геометрия расчетного бенчмарк-теста

Таблица 1

Характеристики состава и геометрии размножающих систем

Вариант теста	$M_{\text{H}_2\text{O}} / M_{\text{UO}_2+\text{PuO}_2}$	Радиус, см	$M_{\text{PuO}_2} / M_{\text{UO}_2+\text{PuO}_2}$	$^{238}\text{Pu}/\text{Pu}$	$^{240}\text{Pu}/\text{Pu}$	$^{241}\text{Pu}/\text{Pu}$	$^{242}\text{Pu}/\text{Pu}$
1	2	3	4	5	6	7	8
1	3%	17.0	100%	71%	17%	11%	1%
2	3%	22.5	30%				
3	3%	46.0	12.5%				
4	3%	17.7	100%	64%	23%	10%	3%
5	3%	24.1	30%				
6	3%	52.5	12.5%				
7	3%	15.0	100%	96%	4%	0%	0%
8	3%	19.0	30%				
9	3%	40.0	12.5%				
10	1%	17.0	100%	71%	17%	11%	1%
11	1%	22.5	30%				
12	1%	46.0	12.5%				
13	5%	17.0	100%	71%	17%	11%	1%
14	5%	22.5	30%				
15	5%	46.0	12.5%				

В спецификации бенчмарк-теста определены следующие расчетные характеристики, вычисленные с использованием системы константного обеспечения РОСФОНД/БНАБ-РФ:

- эффективный коэффициент размножения $k_{\text{эфф}}$;
- одногрупповые интегральные коэффициенты чувствительности всех изотопов, входящих в состав топливных композиций;
- априорная константная погрешность в $k_{\text{эфф}}$, обусловленная ковариационными матрицами погрешности ядерных констант БНАБ;

– перечень интегральных экспериментов, отобранных для уточнения расчетных предсказаний $k_{эфф}$;

– апостериорная погрешность в $k_{эфф}$, полученная с учетом отобранных интегральных экспериментов путем корректировки констант на основе подходов, методик и кодов, реализованных в системе ИНДЕКС.

Данный бенчмарк-тест направлен, в первую очередь, на верификацию методик определения смещений и погрешностей в величине $k_{эфф}$, а также на тестирование библиотек оцененных ядерных данных и ковариационных матриц погрешностей групповых констант. Поскольку сам тест является чисто расчетным (отсутствует сопоставление с экспериментальными данными), по условиям бенчмарка значения $k_{эфф}$ предполагались неизвестными. Данное обстоятельство делает невозможным ориентироваться в расчетах на заранее известный результат, поэтому акцент в анализе данного бенчмарк-теста смещается от сопоставления расчетно-экспериментальных расхождений на анализ разброса в расчетных данных, полученных с использованием различных библиотек (так называемая наблюдаемая константная погрешность). Такого рода постановка задачи также позволяет апробировать расчетные методы и коды, используемые для повышения точности оценки апостериорной и априорной константной погрешностей.

РАСЧЕТНЫЕ МЕТОДИКИ И РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ

Оценка апостериорной и априорной константной погрешностей была выполнена с использованием системы кодов и архивов данных ИНДЭКС. В основе реализованной в системе ИНДЭКС методики расчетов лежит метод максимального правдоподобия [8]. Возможности данного метода верифицированы и продемонстрированы в работах [9 – 11]. Суть метода заключается в нахождении наиболее правдоподобных поправок к варьируемым параметрам (нейтронным сечениям), учет которых позволяет получить наилучшее согласие между результатами расчетов и экспериментальными величинами для интересующего функционала (в данном случае это $k_{эфф}$) для рассматриваемой группы экспериментов. Это достигается путем нахождения максимума функции правдоподобия L , имеющей вид (с точностью до несущественного множителя) $\exp(-Z^2/2)$, где величина Z^2 в показателе экспоненты определяется соотношением

$$Z^2 = \mathbf{S} \cdot \mathbf{W}^{-1} \cdot \mathbf{S}^T + (\Delta \mathbf{k} + \mathbf{H}^T \cdot \mathbf{S}) \cdot \mathbf{U}^{-1} (\Delta \mathbf{k} + \mathbf{H}^T \cdot \mathbf{S})^T, \quad (1)$$

где \mathbf{S} – искомый вектор поправок к параметрам; \mathbf{H} – матрица коэффициентов чувствительности $k_{эфф}$ к параметрам; \mathbf{U} и \mathbf{W} – ковариационные матрицы погрешностей результатов экспериментов (величин $k_{эфф}$) и искомых параметров (нейтронных сечений); $\Delta \mathbf{k}$ – вектор расхождений между расчетными и экспериментальными величинами $k_{эфф}$.

Из выражения (1) можно получить соотношение для искомых поправок

$$\mathbf{S} = \mathbf{W} \cdot \mathbf{H}^T \cdot (\mathbf{U} + \mathbf{H} \cdot \mathbf{W} \cdot \mathbf{H}^T)^{-1} \Delta \mathbf{k}, \quad (2)$$

а также выражение для матрицы ковариаций параметров \mathbf{W}' , учитывающей найденные поправки:

$$\mathbf{W}' = \mathbf{W} - \mathbf{W} \cdot \mathbf{H} \cdot (\mathbf{U} + \mathbf{H} \cdot \mathbf{W} \cdot \mathbf{H}^T)^{-1} \Delta \mathbf{k}. \quad (3)$$

С помощью матрицы \mathbf{W}' можно оценить новую матрицу \mathbf{V}' ожидаемых расчетных погрешностей по откорректированным константам и апостериорную константную погрешность расчета с учетом данных интегральных экспериментов, а также поправки к результатам расчетов $\Delta \mathbf{k}'$:

$$\mathbf{V}' = \mathbf{H} \cdot \mathbf{W}'^{-1} \cdot \mathbf{H}^T, \quad (4)$$

$$\Delta \mathbf{k}' = \Delta \mathbf{k} + \mathbf{H}^T \cdot \mathbf{S}. \quad (5)$$

Величины $k_{эфф}$ для предложенных тестовых вариантов были рассчитаны по коду

MCNP [12] с использованием системы констант РОСФОНД/БНАБ-РФ и зарубежных библиотек оцененных ядерных данных (ENDF/B-VII.0, JEFF-3.2, JENDL-4.0). Результаты сравнения полученных результатов приведены в табл. 2. На их основании (колонка 2) следует вывод о том, что величины $k_{эфф}$, полученные по библиотеке оцененных нейтронных данных РОСФОНД и ее групповой версии БНАБ-РФ, согласуются в пределах 0.1%. При этом средние расхождения результатов расчета $k_{эфф}$ с полученными по библиотеке РОСФОНД и зарубежным библиотекам оцененных ядерных данных не превышают 0.25%.

Таблица 2

Сравнение результатов расчетов по разным системам констант

Вариант теста	БНАБ-РФ/РОСФОНД	ENDF/B-VII/РОСФОНД	JEFF-3.2/РОСФОНД	JENDL-4.0/РОСФОНД
1	0.07%	0.21%	-0.25%	0.21%
2	-0.01%	0.21%	-0.10%	0.04%
3	-0.09%	0.07%	-0.12%	-0.06%
4	0.07%	0.28%	-0.16%	0.21%
5	-0.02%	0.22%	-0.07%	0.04%
6	-0.07%	0.07%	-0.13%	-0.06%
7	0.02%	0.71%	0.36%	0.79%
8	-0.03%	0.48%	0.34%	0.42%
9	-0.08%	0.28%	0.21%	0.22%
10	0.07%	0.18%	-0.26%	0.15%
11	0.05%	0.18%	-0.11%	-0.04%
12	0.04%	0.19%	-0.23%	-0.05%
13	0.06%	0.24%	-0.23%	0.22%
14	-0.07%	0.15%	-0.02%	0.05%
15	-0.12%	0.00%	-0.03%	-0.05%

Разброс в значениях $k_{эфф}$, рассчитанных с использованием различных библиотек оцененных ядерных данных, лежит в интервале от -0.26 до 0.79%. Максимальные расхождения соответствуют варианту 7, в котором в состав топливной композиции входит только PuO_2 с максимальным содержанием изотопа ^{239}Pu , равным 96%.

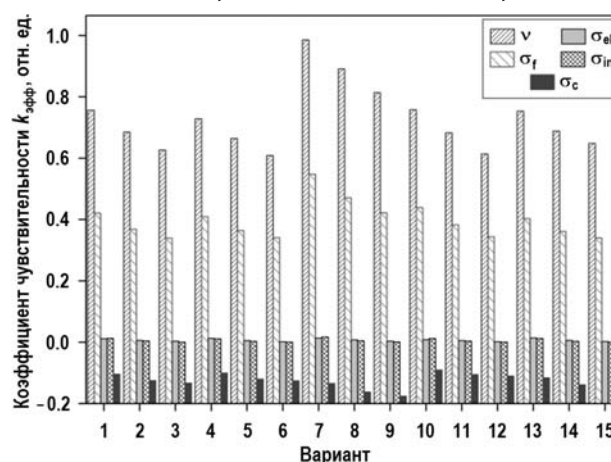


Рис. 2. Коэффициенты чувствительности $k_{эфф}$ к сечениям ^{239}Pu для различных моделей бенчмарк-теста

Анализ одnogрупповых коэффициентов чувствительности показал, что для вариантов с большими значениями коэффициентов чувствительности $k_{эфф}$ к нейтронным сечениям ^{239}Pu (рис. 2), в частности, для вариантов 7 и 8, наблюдается наибольшее различие в результатах расчета $k_{эфф}$ с использованием различных библиотек оцененных ядерных данных (лучшее согласие для других вариантов может быть объяснено компенсацией ошибок в константах других изотопов плутония и изотопов урана). Поскольку значения одnogрупповых коэффициентов чувствительности $k_{эфф}$ к нейтронным сечениям ^{239}Pu на порядок выше значений коэффициентов чувствительности к нейтронным сечениям остальных топливных изотопов (^{238}U , ^{235}U , $^{240-242}\text{Pu}$), то можно заключить, что наблюдаемые расхождения в значениях $k_{эфф}$ обусловлены разбросом в нейтронных данных для изотопа ^{239}Pu , представленных в различных библиотеках оцененных ядерных данных.

Таблица 3

Список бенчмарк-экспериментов

№	Идентификатор эксперимента в ICSBEP	Идентификатор критической конфигурации	№	Идентификатор эксперимента в ICSBEP	Идентификатор критической конфигурации
1	PST001	1–6	19	PST032	2, 6, 11
2	PST002	1, 7	20	PMF001	1
3	PST003	1, 5	21	PMF002	1
4	PST004	3, 5, 6, 13	22	PMF011	1
5	PST005	1, 9	23	PMF022	1
6	PST006	2	24	PMF024	1
7	PST009	3	25	PMF027	1
8	PST010	1–3, 9, 11	26	PMF029	1
9	PST011	1, 8	27	PMF031	1
10	PST012	7–13	28	MST002	2, 3
11	PST018	1, 5, 9	29	MST003	4, 7, 9, 10
12	PST020	3, 5, 8, 9	30	MST004	2, 5, 7
13	PST021	1, 3, 4	31	MST005	2, 3, 4, 7
14	PST022	1, 2, 3, 8	32	MST006	1
15	PST023	1, 8, 17, 34	33	MST007	1
16	PST025	3, 10, 17, 22, 31, 36, 42	34	MST010	1
17	PST026	3, 16	35	БФС	31-5, 38-2, 42, 97-1, 97-2, 97-3, 97-4, 99-1, 99-2, 101-1, 101-2, 101-2A, 101-3
18	IMF007	1			

Для оценки апостериорной погрешности рассматриваемых моделей были отобраны эксперименты из международного справочника бенчмарк-экспериментов по критической безопасности ICSBEP (Criticality Safety Benchmark Experiments Project Handbook) [13]. Данные этих бенчмарк-экспериментов использовались в работах [14 – 17] для оценки точности расчетов систем внешнего топливного цикла с МОКС-топливом. В таблице 3 приведен перечень из 101-го бенчмарк-экспериментов, включающих в себя гомогенные растворы с плутонием (PST-идентификатор), со смесями урана и плутония (MST-идентификатор), а также бенчмарк-модели экспериментов, выполненных на комплексе быстрых физических стендов БФС-1 и -2 [18 – 20].

На основе ковариационных матриц погрешностей нейтронных сечений для групповой библиотеки БНАБ, согласно формуле (4), были получены значения относительной априорной константной погрешности расчетов $\delta k_{эфф}$ для всех 15-ти моделей бенчмарк-теста, значения которых приведены в табл. 4.

Таблица 4

Априорная $\delta k_{эфф}$ и апостериорная $\delta'k_{эфф}$ погрешности бенчмарк-теста, обусловленные погрешностями нейтронных сечений

№	$\delta k_{эфф}$, %	$\delta'k_{эфф}$, %	№	$\delta k_{эфф}$, %	$\delta'k_{эфф}$, %	№	$\delta k_{эфф}$, %	$\delta'k_{эфф}$, %
1	0.95	0.31	6	0.95	0.33	11	0.81	0.29
2	0.84	0.32	7	1.16	0.22	12	0.81	0.28
3	0.90	0.32	8	0.95	0.24	13	0.92	0.33
4	0.93	0.31	9	0.95	0.22	14	0.89	0.35
5	0.84	0.32	10	1.01	0.29	15	0.96	0.33

С учетом экспериментальных данных (см. табл. 3) методом максимального правдоподобия были оценены поправки к величинам $k_{эфф}$, учитывающие полученные в результате расчетов наиболее правдоподобные смещения нейтронных констант в пределах погрешностей (откорректированные константы). Соответствующие этим константам откорректированные значения $k_{эфф}$ показаны на рис. 3. На основе сформированной в результате расчетов откорректированной ковариационной матрицы погрешностей была рассчитана величина апостериорной константной погрешности $k_{эфф}$, которая представлена в табл. 3 (обозначена $\delta'k_{эфф}$) и на рис. 3 (на рисунке также приведены априорная константная погрешность и разброс значений $k_{эфф}$, рассчитанных по разным библиотекам оцененных ядерных данных). Как можно видеть, привлечение информации по выполненным ранее экспериментальным исследованиям интегральных характеристик МОКС-топлива позволяет в три раза (в среднем от 1 до 0.3%) снизить константную погрешность в $k_{эфф}$ для простых систем с промежуточным спектром нейтронов.

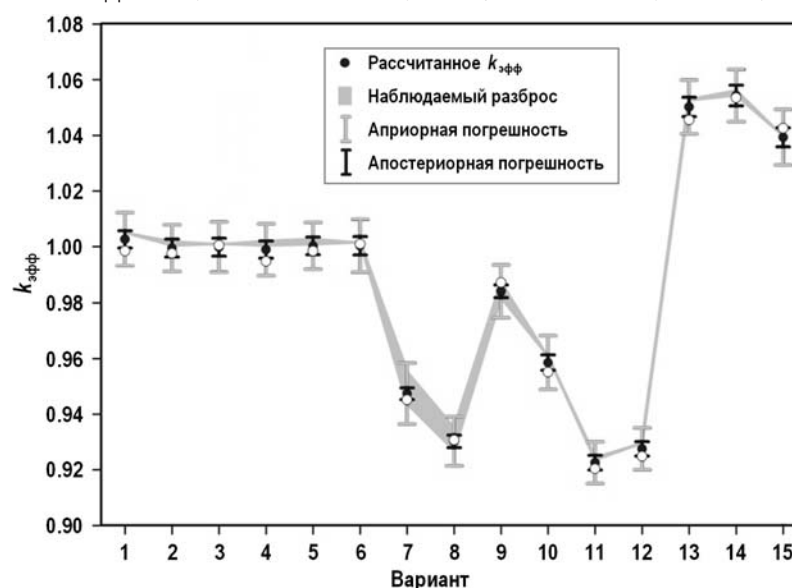


Рис. 3. Сводные результаты расчетов бенчмарк-теста

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В соответствии с предложенной программой расчетов численного бенчмарк-теста OECD/NEA по обоснованию критической безопасности систем с МОКС-топливом, предложенного экспертной группой по анализу неопределенностей при оценке критической безопасности EGUACSA, была выполнена серия расчетов, направленных на верификацию константного обеспечения РОСФОНД/БНАБ-РФ. На основании анализа результатов расчетов показано следующее.

– Максимальное значение отклонения в расчетных значениях $k_{эфф}$, полученных с использованием различных библиотек оцененных ядерных данных (ENDF/B-VII.0, JEFF-3.2, JENDL-4.0), в сравнении с результатами, полученными по библиотеке РОСФОНД, достигает 0.8%. Априорная погрешность расчета величины $k_{эфф}$, обусловленная неопределенностью в ядерных данных и вычисленная с использованием ковариационных матриц погрешностей нейтронных сечений БНАБ, лежит в пределах от 0.8 до 1.2%. Таким образом, оцененное значение априорной константной погрешности $k_{эфф}$ совпадает с наблюдаемым разбросом в расчетных значениях $k_{эфф}$, что свидетельствует о достоверности данных по погрешностям нейтронных сечений БНАБ.

– Максимальное отклонение расчетных значений $k_{эфф}$ ~0.8% и максимальное значение априорной погрешности ~1.2% соответствуют варианту 7 (наибольшее содержание ^{239}Pu в топливе) и обусловлены разбросом нейтронных данных для данного изотопа в различных библиотеках оцененных ядерных данных.

– Отклонение результатов расчетов в значениях $k_{эфф}$, полученных по библиотеке РОСФОНД и ее групповой версии БНАБ-РФ, не превышает 0.1%, что демонстрирует высокую точность константного обеспечения РОСФОНД/БНАБ-РФ для расчетов параметров критической безопасности размножающих систем с МОКС-топливом.

– Привлечение информации по выполненным ранее экспериментальным исследованиям интегральных характеристик МОКС-топлива позволяет снизить в три раза (в среднем с 1 до 0.3%) константную погрешность в $k_{эфф}$ для простых систем с промежуточным спектром нейтронов.

Литература

1. Веб-сайт ОЭСР/АЯЭ. Электронный ресурс: <https://www.oecd-nea.org/> (дата доступа 05.06.2018).
2. Веб-страница экспертной группы ОЭСР/АЯЭ по анализу неопределенности в задачах оценки критической безопасности. <https://www.oecd-nea.org/science/wpncs/UACSA/> (дата доступа 05.06.2018).
3. 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. – Вып. 12. – С. 3-21.
4. Андрианова О.Н., Головки Ю.Е., Рожихин Е.В., Якунин А.А. Верификация библиотеки констант БНАБ-РФ на модельных задачах и специально отобранных бенчмарк-экспериментах // Ядерная физика и инжиниринг. – 2012. – Т. 3. – № 2. – С. 120-126.
5. Мантуров Г.Н. Система кодов и ядерных данных для нейтронно-физических расчетов реакторов и оценки погрешностей // ВАНТ. Серия: Ядерно-реакторные константы. – 2017. – № 1. – С. 115-128.
6. Manturov G., Semenov M., et al. System of codes and nuclear data for neutronics calculations of fast reactors and uncertainty estimation / Proc. of the International Conference on Fast Reactors and Related Fuel Cycles: Next Generation Nuclear Systems for Sustainable Development (FR17). – Ekaterinburg, Russian Federation, June 26-29, 2017. – Conference ID 50810 (IAEA-CN245-475).
7. Андрианова О.Н., Головки Ю.Е., Жердев Г.М. и др. Тестирование ковариационных матриц погрешностей системы констант БНАБ // Известия высших учебных заведений. Ядерная энергетика. – 2014. – № 2. – С. 109-117.
8. 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». – Вып. 10. – М.: Атомиздат, 1972. – 88 С.
9. 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.
10. Ivanova T., Laville C., Dyrda J., Mennerdahl D., Golovko Y. OECD/NEA expert group on uncertainty analysis for criticality safety assessment: results of benchmark on sensitivity

calculation (phase III). В сборнике International Conference on the Physics of Reactors 2012, PHYSOR 2012: Advances in Reactor Physics 2012. – Knoxville, Tennessee, USA. – PP. 2762-2780.

11. Головки Ю.Е. Применение метода неопределенных множителей Лагранжа в анализе на непротиворечивость экспериментов на примере систем с высокообогащенным ураном. // Известия высших учебных заведений. Ядерная энергетика. – 2012. – № 3. – С. 5-15.

12. MCNP – A General Monte Carlo N-Particle Transport Code, Version 5, Volume I: Overview and Theory, LA-UR-03-1987, Los Alamos, US, 2008. – 416 P.

13. International Handbook of Evaluated Criticality Safety Benchmark Experiments (ICSBER). Электронный ресурс: <https://www.oecd-nea.org/science/wpncs/icsber/handbook.html> (дата доступа 05.07.2018).

14. Головки Ю.Е., Мантуров Г.Н. Использование метода неопределенных множителей Лагранжа для устранения противоречий при анализе бенчмарк-экспериментов ICSBER по критической безопасности. // ВАНТ. Серия: Ядерно-реакторные константы. – 2017. – № 2. – С. 52-60.

15. Golovko Y., Rozhikhin Y., Koscheev V., Tsibulya A. Evaluation of accuracy of calculational prediction of criticality based on ICSBER handbook experiments / International Conference on the Physics of Reactors 2008. – PHYSOR 2008, Interlaken, Switzerland. – PP. 1677-1684.

16. Андрианова О.Н., Кошечев В.Н., Ломаков Г.Б., Мантуров Г.Н. Совместное использование дифференциальных и интегральных экспериментов для уточнения оцененных ядерных данных // ВАНТ. Серия: Ядерно-реакторные константы. – 2017. – № 1. – С. 98-105.

17. Андрианова О.Н., Мантуров Г.Н., Рожихин Е.В. Применение неаналоговых методов в коде MCNP для расчетного анализа измерений скоростей реакций на критических сборках БФС // Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2016. – № 2. – С. 66-76.

18. Doulin V., Kochetkov A., Pavlova O. et.al. BFS1 FUND EXP 003. Experimental program performed at the BFS-42 assembly k-infinity experiments for ^{238}U in fast neutron spectra: measurements with plutonium mixed with depleted uranium dioxide and polyethylene, International handbook of evaluated reactor physics benchmark experiments. CD version, NEA/NSC/DOC (2007) 1, 2007.

19. Doulin V., Kochetkov A., Pavlova O. et. al. BFS2 FUND EXP 001. Experimental program performed at the BFS-31 assembly k-infinity experiments for ^{238}U in fast neutron spectra: measurements with plutonium mixed with depleted uranium dioxide and polyethylene. International handbook of evaluated reactor physics benchmark experiments. CD version, NEA/NSC/DOC (2007) 1, 2007.

20. Doulin V., Kochetkov A., Pavlova O. et. al. BFS2 FUND EXP 001. BFS-97, -99, -101 assemblies: experimental program on critical assemblies with heterogeneous compositions of plutonium, depleted uranium dioxide, and polyethylene. International handbook of evaluated reactor physics benchmark experiments. CD version, NEA/NSC/DOC (2007) 1, 2007.

Поступила в редакцию 15.03.2018 г.

Авторы

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

E-mail: oandrianova@ippe.ru

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

E-mail: yugolovko@ippe.ru

Мантуров Геннадий Николаевич, нач.лаб., д.т.н.

E-mail: mant@ippe.ru

UDC 621.039.51.17

VERIFICATION OF THE ROSFOND/ABBN NUCLEAR DATA BASED ON THE OECD/NEA BENCHMARK ON CRITICALITY SAFETY OF MOX-FUELED SYSTEMS

Andrianova O.N., Golovko Yu.E., Manturov G.N.

JSC «SSC RF-IPPE n.a. A.I. Leypunsky»

1 Bondarenko sq., Obninsk, Kaluga reg., 249033 Russia

ABSTRACT

The paper presents the results of a computational analysis of the benchmark OECD/NEA test to assess the accuracy of critical safety parameters of multiplying MOX-fueled systems. The computational test is a set of 15 spherical multiplying systems that differ in composition and geometry characteristics. According to the test conditions, the k_{eff} values of the analyzed systems are unknown in advance. As part of the computational analysis of the test, using national codes and nuclear data libraries, along with the calculation of k_{eff} , it is also necessary to estimate the a priori (due to the accuracy of the nuclear data used) and a posteriori (taking into account the accumulated experimental information) k_{eff} calculation errors. Based on the benchmark test, an updated version of the ROSFOND/ABBN-RF nuclear data was tested. The results of estimating the a priori and a posteriori errors in k_{eff} , using the INDEX system for the proposed test models, are presented. The analysis of the calculation data shows that (1) the observed spread in the k_{eff} values obtained using the Russian ROSFOND library and foreign evaluated nuclear data libraries (ENDF/B-VII.0, JEFF-3.2, JENDL-4.0) varies from -0.3 up to 0.8% ; and (2) the deviation of the calculation results in the k_{eff} values, obtained by the ROSFOND library and its group version, ABBN-RF, does not exceed 0.1% . The average a priori uncertainty in k_{eff} for all the tested variants of multiplying systems is about 1% and, taking into account the selected set of experimental criticality data for MOX-fueled systems, including experiments at the BFS facilities, the average a posteriori uncertainties in k_{eff} can be reduced to 0.3% . The performed evaluations confirm the high accuracy of the ROSFOND/ABBN nuclear data for calculating the critical safety parameters of multiplying MOX-fueled systems.

Key words: MOX fuel, integral experiments, BFS critical facility, accuracy evaluation, effective multiplication factor, constant error, OECD/NEA test, maximum likelihood method.

REFERENCES

1. OECD/NEA web-site, Available at: <https://www.oecd-neo.org/> (accessed July 05, 2018).
2. Web-page of WPNCs Expert Group on Uncertainty Analysis for Criticality Safety Assessment (UACSA), Available at: <https://www.oecd-neo.org/science/wpncs/UACSA/> (accessed July 05, 2018).
3. Zbrodskaya S.V., Ignatyuk A.V., Koshcheev V.N., Manochin V.N., Nikolaev M.N., Pronyaev V.G. RUSFOND – Russian national library of evaluated neutron data. *VANT. Ser.: Yadernye Constanty*. 2007, no. 12. pp. 3-21 (in Russian).
4. Andrianova O. N., Golovko Yu. E., Rozhihin E. V., Yakunin A. A. Verifikatsiya biblioteki konstant BNAB-RF na modelnykh zadachah i spetsialno otobrannykh benchmark-eksperimentah. *Yadernaya fizika i inzhiniring*. 2012, v. 3, no. 2, pp. 120-126 (in Russian).
5. Manturov G. Codes and nuclear data for reactor neutronics calculations and uncertainty estimation. *VANT. Ser.: Yadernye Reactornye Constanty*. 2017, no. 1, pp. 115-128 (in Russian).
6. Manturov G., Koscheev V., Nikolaev M., Peregodov A., Semenov M., Tsiboulia T. System of codes and nuclear data for neutronics calculations of fast reactors and uncertainty estimation. Proc. of International Conference on Fast Reactors and Related Fuel Cycles: Next Generation Nuclear Systems for Sustainable Development (FR17). Ekaterinburg, Russian Federation, June 26-29, 2017. Conference ID 50810 (IAEA-CN245-475).
7. Andrianova O., Golovko Yu., Jerdev G., Zadornov D., Koscheev V., Manturov G., Peregodov A.,

- Tsibulva A. Testing covariance matrices of uncertainties in the BNAB data system. *Izvestia Vysshikh Uchebnikh Zavedeniy. Yadernaya Energetika*. 2014, no. 2, pp. 109-117 (in Russian).
8. Usachev L., Bobkov Y. Planning on optimum set of microscopic experiments and evaluations to obtain a given accuracy in reactor parameter calculations, INDC CCP-19U, IAEA Int. Nucl. Data Committee, 1972.
9. Golovko Yu.E., Koshchev V.N., Manturov G.N., Tsibulja A.M. Primenenie metoda naimen'shih kvadratov dlja ocenki konstantnoj pogreshnosti raschetov kritichnosti sistem s plutonium. *Yadernaya fizika i inzhiniring*. 2014, v. 5, no. 4, p. 293 (in Russian).
10. Ivanova T., Laville C., Dyrda J., Mennerdahl D., Golovko Y. OECD/NEA expert group on uncertainty analysis for criticality safety assessment: results of benchmark on sensitivity calculation (phase III). International Conference on the Physics of Reactors 2012, PHYSOR 2012: Advances in Reactor Physics 2012, Knoxville, Tennessee, USA, pp. 2762-2780.
11. Golovko Yu. Application of the undetermined lagrangian coefficients method in the analysis on consistency of experiments on the example of systems with high enriched uranium from ICSBEP handbook. *Izvestia Vysshikh Uchebnikh Zavedeniy. Yadernaya Energetika*. 2012, no. 3, pp. 5-15 (in Russian).
12. MCNP – A General Monte Carlo N-Particle Transport Code, Version 5, Volume I: Overview and Theory, LA-UR-03-1987, Los Alamos, US, 2008. – 416 P.
13. International Handbook of Evaluated Criticality Safety Benchmark Experiments (ICSBEP), Available at: <https://www.oecd-nea.org/science/wpncs/icsbep/handbook.html> (accessed July 05, 2018).
14. Golovko Yu., Manturov G. Application of the undetermined lagrangian coefficients method for eliminate contradictions in the analysis of ICSBEP benchmark experiments on criticality safety. *VANT. Ser.: Yaderno-Reactornye Constanty*. 2017, no. 2, pp. 52-60 (in Russian).
15. Golovko Yu., Rozhikhin Y., Tsibulya A., Koscheev V. Evaluation of accuracy of calculational prediction of criticality based on ICSBEP handbook experiments. Int. Conf. on the Physics of Reactors 2008. – PHYSOR 2008, Interlaken, Switzerland, pp. 1677-1684.
16. Andrianova O., Koscheev V., Lomakov G., Manturov G. Combined use of differential and integral experiments for adjustment of evaluated nuclear data. *VANT. Ser.: Yaderno-Reactornye Constanty*. 2017, no. 1, pp. 98-105 (in Russian).
17. Andrianova O., Manturov G., Rozhikhin Y. Application of MCNP nonanalog techniques for calculations of reaction rate measurements at the BFS facilities. *Izvestia vuzov. Yadernaya energetika*. 2016, no. 2, pp. 66-76 (in Russian).
18. Doulin V., Kochetkov A., Pavlova O., Rozhikhin Y., Semenov M. BFS1 FUND EXP 003. Experimental program performed at the BFS-42 assembly k-infinity experiments for ^{238}U in fast neutron spectra: measurements with plutonium mixed with depleted uranium dioxide and polyethylene. International handbook of evaluated reactor physics benchmark experiments. CD version, NEA/NSC/DOC (2007) 1, 2007.
19. Doulin V., Kochetkov A., Pavlova O., Rozhikhin Y., Semenov M. BFS2 FUND EXP 001. Experimental program performed at the BFS-31 assembly k-infinity experiments for ^{238}U in fast neutron spectra: measurements with plutonium mixed with depleted uranium dioxide and polyethylene. International handbook of evaluated reactor physics benchmark experiments. CD version, NEA/NSC/DOC (2007) 1, 2007.
20. Doulin V., Kochetkov A., Pavlova O., Rozhikhin Y., Semenov M. BFS2 FUND EXP 001. BFS-97, -99, -101 assemblies: experimental program on critical assemblies with heterogeneous compositions of plutonium, depleted uranium dioxide, and polyethylene. The International handbook of evaluated reactor physics benchmark experiments. CD version, NEA/NSC/DOC (2007) 1, 2007.

Authors

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

E-mail: oandrianova@ippe.ru

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

E-mail: yugolovko@ippe.ru

Manturov Gennady Nikolaevich, Head of Laboratory, Dr. Sci. (Engineering)

E-mail: mant@ippe.ru