

СОПОСТАВЛЕНИЕ ТОЧНОСТЕЙ РАСЧЕТА НЕЙТРОННО-ФИЗИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК МОДЕЛИ БЫСТРОГО РЕАКТОРА С ТЯЖЕЛЫМ ЖИДКОМЕТАЛЛИЧЕСКИМ ТЕПЛОНОСИТЕЛЕМ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ РАЗЛИЧНЫХ НЕЙТРОННЫХ ДАННЫХ

Андрианов А.А., Андрианова О.Н., Купцов И.С., Уварова А.А.

*ИАТЭ НИЯУ МИФИ,
249039, Калужская обл., г. Обнинск, Студгородок, 1*



На примере упрощенной модели быстрого реактора с плотным уран-плутониевым топливом и тяжелым жидкометаллическим теплоносителем с использованием актуальных версий библиотек оцененных нейтронных данных ENDF/B – VIII, JENDL 5, TENDL 2021, JEFF 4T1 и БРОНД 3.1 оценены разброс значений, константные погрешности и точности расчетного предсказания следующих нейтронно-физических характеристик: эффективный коэффициент размножения (начало и конец кампании), эффективная доля запаздывающих нейтронов, доплеровский эффект реактивности, коэффициент воспроизводства, запас реактивности на выгорание и другие характеристики выгорания топлива. Отмечено, что в целом значения погрешностей реакторных функционалов, оцененные по актуальным версиям библиотек нейтронных данных, снизились по сравнению со значениями погрешностей, оцененными по предыдущим релизам библиотек. Проанализировано как за прошедшие десятилетия изменились значения целевых точностей расчетного предсказания основных нейтронно-физических характеристик быстрых реакторов, а также оценены требования к точностям нейтронных данных, позволяющих достичь заявляемые целевые точности. Основные выводы по работе представлены в двух разрезах: влияние оцененных нейтронных данных из различных библиотек на точность расчета основных нейтронно-физических характеристик быстрых реакторов и возможности повышения точности расчетных предсказаний нейтронно-физических характеристик быстрых реакторов посредством учета результатов интегральных измерений.

Ключевые слова: реактор на быстрых нейтронах, оцененные нейтронные данные, ковариационные матрицы, коэффициенты чувствительности, неопределенность, усвоение данных.

Для цитирования: Андрианов А.А., Андрианова О.Н., Купцов И.С., Уварова А.А. Сопоставление точностей расчета нейтронно-физических характеристик модели быстрого реактора с тяжелым жидкометаллическим теплоносителем с использованием различных нейтронных данных. // Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2024. – № 3. – С. 109–124. DOI: <https://doi.org/10.26583/npe.2024.3.09>

ВВЕДЕНИЕ

Для оценки неопределенности и точности расчетного предсказания нейтронно-физических характеристик ядерных реакторов, радиационной защиты, технологий внешнего топливного цикла требуются данные по погрешностям характеристик взаимодействия нейтронов с ядрами вещества. Современное состояние знаний о нейтронных данных и их погрешностях отражают различные национальные библиотеки оцененных нейтронных данных общего назначения: БРОНД 3.1 (Российская Федерация, 2016 г.), ENDF/B – VIII (США, 2018 г.), JENDL-5 (Япония, 2021 г.), JEFF 3.3 и JEFF 4T1 (Европейский союз, 2017 г., тестовая версия 2022 г.), TENDL 2021 (МАГАТЭ, 2021 г.) [1]. Применительно к задаче проектирования реакторов на быстрых нейтронах (РБН) оцененные нейтронные данные определяют точности расчетного предсказания основных реакторно-физических характеристик, с опорой на которые осуществляется оптимизация компоновок активной зоны, режимов перегрузок ядерного топлива и параметров технологий внешнего топливного цикла и т.п.

Рабочие группы Агентства по ядерной энергии (АЯЭ) ОЭСР совместно с Секцией ядерных данных Международного агентства по атомной энергии (МАГАТЭ) на протяжении нескольких десятилетий занимаются анализом и оценкой влияния неопределенностей в нейтронных данных на точность расчетного предсказания нейтронно-физических характеристик ядерных реакторов Поколения IV [2]. Конечной целью подобного анализа является определение достигнутых и желаемых (целевых) точностей расчетного предсказания реакторно-физических характеристик, а также приоритетов в уточнении нейтронных данных, позволяющих повысить точность и надежность расчетного предсказания характеристик проектируемых инновационных установок [3]. Вследствие постоянно повышающихся требований к показателям экономической эффективности и безопасности проектируемых реакторных систем Поколения IV как целевые точности расчетного предсказания основных реакторно-физических характеристик, так и требуемые точности нейтронных данных периодически пересматриваются в сторону их ужесточения и уточняются по мере накопления экспериментальной информации и развития расчетных моделей, методов и инструментов. Целевые и достигнутые точности расчета основных нейтронно-физических характеристик применительно к РБН представлены в табл. 1 («текущее состояние» – результат обобщения оценок, выполненных в рамках рабочих групп АЯЭ ОЭСР).

На примере упрощенной модели РБН с нитридным уран-плутониевым топливом и тяжелым жидкометаллическим теплоносителем с использованием актуальных версий библиотек оцененных нейтронных данных выполнены расчеты основных нейтронно-физических характеристик (эффективный коэффициент размножения – $k_{эф}$, доплеровский коэффициент реактивности – $\Delta\rho_{д}$, запас реактивности на выгорание – $\Delta\rho_{выг}$, эффективная доля запаздывающих нейтронов – $\beta_{эф}$, коэффициент воспроизводства – $KВ$ и прочие характеристики выгорания топлива) и осуществлена оценка их константной погрешности как

Таблица 1

Целевые и достигнутые точности расчета нейтронно-физических характеристик РБН

Параметр	Достигнутые точности (текущее состояние) [4]	Целевые точности (40 лет назад) [5]	Целевые точности (текущее состояние) [4]
Эффективный коэффициент размножения, $k_{эф}$	~1%	1%	0,2–0,3%
Коэффициент неравномерности энерговыделения	2%	2%	1%
Распределение энерговыделения в АЗ	5–7%	–	2%
BG	0,05–0,06	–	0,02
KB	~1%	2%	0,5%
Изменение реактивности из-за выгорания топлива	3% 0,5% Δk	5%	<1% 0,3% Δk
Коэффициенты реактивности			
большие эффекты	10%	10–15%	5%
малые эффекты	20%		10%
Доплер	3–5%		–
Эффективность стержней регулирования			
отдельных стержней	10%	5%	5%
групп стержней	20%	–	10%
Кинетические параметры	5–10%	–	2–5%
Концентрации нуклидов на конец кампании			
Топливные нуклиды	1–2%	10%	<1%
Минорные актиниды	10–20%	30%	10%
Продукты деления (ПД)	20%	20%	10%

без, так и с учетом результатов интегральных измерений на критических сборках БФС-61 [6, 7], подобных по своим нейтронно-физическим свойствам целевому объекту. С использованием ПК ОНИКС [8] также решена «обратная» задача по определению требований к сечениям взаимодействия нейтронов с ядрами актинидов в предположении, что нейтронные константы должны обеспечить целевую точность расчета $k_{эф}$ на конец кампании для рассматриваемой модели РБН на уровне не более 0,2%.

КРАТКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАСЧЕТНЫХ КОДОВ И МОДЕЛИ РБН

Упрощенная цилиндрическая модель РБН со свинцовым теплоносителем и нитридным уран-плутониевым топливом представляет собой гомогенную смесь уран-плутониевого топлива (33% мас.), свинца (60% мас.) и железа (7% мас.) (объемные доли материалов аналогичны модели БФС-61), окруженную отражателем из свинца (88% мас.) и железа (12% мас.) [9]. Состав плутония в топливе взят из открытых источников, содержание плутония в топливе принято равным 13% мас., содержание ^{235}U в обедненном уране – 0,2% [10]. Высота активной зоны выбрана равной 110 см, радиус определен из условия критичности, а толщины торцевого и бокового отражателей подобраны таким образом, чтобы утечка

нейтронов из активной зоны была аналогична утечке из типового проекта РБН со свинцовым отражателем. Расчет кампании топлива длительностью 900 эфф. сут (без перегрузок) модели РБН проведен для режима работы на номинальном уровне тепловой мощности 700 МВт. В ходе расчетного моделирования не воспроизводился режим частичных перегрузок топлива, длительность микрокампании принималась равной 150 эфф. сут, в конце каждой микрокампании осуществляется остановка на 30 суток.

Нейтронно-физические расчеты выполнялись с использованием прецизионного кода со встроенным кодом расчета изменения нуклидного состава. Для оценки константной неопределенности нейтронно-физических характеристик использовались коды NUCLEX и NUDAPS. В этих кодах реализован функционал оценки константной и технологической неопределенности расчетных характеристик с использованием коэффициентов чувствительности и вариантных расчетов на основе генерации случайных выборок входных данных [11, 12].

ОЦЕНКА АПРИОРНОЙ КОНСТАНТНОЙ ПОГРЕШНОСТИ РАСЧЕТА НЕЙТРОННО-ФИЗИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК РБН

В таблице 2 приводятся разбросы в значениях и константные погрешности для основных нейтронно-физических характеристик ($k_{эф}$, $\Delta\rho_{д}$, $\Delta\rho_{выг}$, $\beta_{эф}$, КВ и характеристики выгорания топлива) рассматриваемой модели РБН, вычисленные по различным библиотекам оцененных нейтронных данных БРОНД 3.1, ENDF/B-VIII, JENDL-5, TENDL 2021 и JEFF 4T. В таблице 3 представлена константная погрешность определения состава топлива на конец кампании модели РБН (900 сут), оцененная по NUCLEX на основе данных по погрешностям одnogрупповых нейтронных сечений, полученным с помощью NUDAPS на основе ковариационных данных из различных библиотек.

В целом значения погрешностей реакторных функционалов, оцененные по рассмотренным версиям библиотек, снизились по сравнению со значениями погрешностей, оцененными по предыдущим релизам библиотек (см., например, [13]). Важно подчеркнуть, в версиях библиотек 2010 – 2011 гг. погрешности нейтронных сечений записывались в двух секциях MF32 (погрешности резонансных параметров) и в MF33 (погрешности сечений в области энергий выше 0,2 МэВ). В последних версиях библиотек данные по погрешностям в резонансной области записываются в секции MF33 для большого числа групп (≈ 1000). Секция MF32 для ^{238}U , необходимая для оценки погрешности факторов резонансной самоэкранировки и доплеровских приращений, исключена из файлов оценок. Ни в одной из анализируемых библиотек нет данных по погрешностям сечений нейтронных реакций азота (исключение составляет библиотека JENDL-5, в которой имеются ковариационные данные для сечения (n, p)).

Выполненные оценки демонстрируют, что сохраняется разброс в 0,7% между расчетными значениями $k_{эф}$, полученным по библиотекам ENDF/B VIII и JEFF 4T. Максимальный разброс по всем анализируемым библиотекам составляет 1%, что соответствует константной погрешности, оцененной по актуальным версиям зарубежных библиотек, лежащей в пределах от 0,84 до 0,95%. Константная погрешность $k_{эф}$ для начального состояния, оцененная по библиотеке БРОНД 3.1, в два раза выше и составляет 1,5% (основной вклад вносят погрешности сечения захвата и неупругого рассеяния нейтронов на ядрах ^{238}U).

Разброс в оценках одnogрупповых сечений взаимодействия нейтронов с ядрами актинидов достаточно высок (для сечения захвата Am и Cm превышает 50%), но при этом

Таблица 2

Разброс в значениях и константные погрешности основных нейтронно-физических характеристик модели РБН, полученные по различным библиотекам оцененных нейтронных данных

Параметр	Библиотека: БРОНД 3.1 (BP), ENDF/B-VIII (EN), JENDL-5 (JL), TENDL 2021 (TL), JEFF 4T (JF)					Разброс в погрешностях, %	Разброс в значениях*, %
	BP	EN	JF	JL	TL		
Относительная погрешность, %							
$k_{эф}$ (ВоС, хол.)**	1.53	0.89	0.98	0.85	0.98	0.85–1.53****	1.43
$k_{эф}$ (ВоС, гор.)***	1.52	0.9	0.96	0.85	0.97	0.85–1.52	1.67
$k_{эф}$ (ЕоС)	1.83	0.99	1.09	0.95	1.09	0.99–1.83	1.02
$\Delta\rho_{д}$, рсм	1.65	1.97	2.05	1.68	2.05	1.68–2.05	–22
$\Delta\rho_{выг}$, рсм	125	49	68	54	68	49–125	–88
KB	1.95	0.83	0.96	0.81	0.95	0.81–1.95	1.64
V, %	0.95	0.78	0.71	0.66	0.71	0.66–0.95	0.72
<p>* Разброс в значениях = (макс–мин)/мин; ** Начальный состав, температура всех материалов 300 К; *** Начальный состав, температура Fe и Pb 600 К, температура топлива 1100 К; **** Минимальное – максимальное значение константной погрешности; $V_{ТМ} = 59.46$ (ГВт сут/ТМ); V – прецизионные расчеты с фиксацией значения тепловой мощности; Реактивности приведены в 1 рсм (per cent mille) = $\rho \times 10^5$; Стационарные расчеты выполнялись для статистики 10^7; для $\beta_{эф}$(ВоС и ЕоС) разброс в значениях составляет 19%; ВоС / ЕоС (от англ. begin / end-of-cycle) – начальное состояние и конец кампании</p>							

сопоставим с погрешностями, принятыми в актуальных версиях зарубежных библиотек. Погрешности, принятые в библиотеке БРОНД 3.1, представляются заниженными для ряда минорных актинидов.

С увеличением температуры активной зоны погрешность нейтронных сечений не изменяется, также погрешность не изменяется в зависимости от сечения разбавления (информация о погрешностях эффектов блокировок ранее содержалась в секции MF32, которая, как отмечено выше, в настоящий момент исключена из актуальных релизов зарубежных библиотек). Таким образом погрешности реакторных функционалов в холодном и горячем состояниях будут одинаковы. Спектральная составляющая неопределенности одногрупповых нейтронных сечений актинидов мала и не превышает 0,3% для сечений захвата и 0,1% для сечений деления.

Наблюдается разброс в данных по запаздывающим нейтронам в зарубежных библиотеках: максимальный разброс в величине $\beta_{эф}$ составляет 19% (статистическая погрешность расчета методом Монте-Карло $2\sigma \sim 9\%$), что делает актуальной задачу корректировки погрешности этого показателя на интегральных измерениях. Минимальные значения $\beta_{эф}$ для начального состояния и на конец кампании (900 сут.) соответствуют расчетам, выполненным по библиотеке JENDL.

Несмотря на то, что в целом значения погрешностей реакторных функционалов, оцененные по актуализированным версиям библиотек, снизились по сравнению со значениями погрешностей, оцененными по предыдущим версиям этих библиотек, константная

Константная погрешность определения состава топлива на конец кампании (900 сут) модели РБН

Нуклид	Библиотека: БРОНД 3.1 (БР), ENDF/B-VIII (EN), JENDL-5 (JL), TENDL 2021 (TL), JEFF 4T (JF) ($\delta n_{\text{ЕОС}}, \%$)					Разброс в погрешностях, %	
	БР	EN	JF	JL	TL	мин	макс
²³⁴ U	3	2	4	3	4	2	4
²³⁵ U	0.8	0.8	1.5	0.4	1.5	0.4	1.5
²³⁶ U	5	4	7	2	7	2	7
²³⁸ U	0.3	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
²³⁷ Np	2	2	2	1.3	4	1.3	4
²³⁸ Pu	4	1.2	7	4	7	1.2	7
²³⁹ Pu	2.0	0.9	0.8	0.8	0.8	0.8	0.9
²⁴⁰ Pu	1.3	1.6	2.7	1.3	2.6	1.3	3
²⁴¹ Pu	3	2	14	4	14	2	14
²⁴² Pu	1.0	1.2	1.4	1.3	1.4	1.0	1.4
²⁴¹ Am	3	1.1	6	2	6	1.1	6
^{242m} Am	6	4	8	5	34	4	34
²⁴³ Am	7	4	9	10	5	4	10
²⁴² Cm	6	2	8	5	8	2	8
²⁴³ Cm	20	23	30	23	62	20	62
²⁴⁴ Cm	8	6	13	14	8	6	14
²⁴⁵ Cm	19	25	17	28	14	14	28

погрешность реакторных функционалов остается выше требуемой проектантами. Это обосновывает необходимость выполнения оценки точности расчетного предсказания реакторных характеристик с учетом совместного анализа накопленной экспериментальной информации по измерениям на критических стендах ($k_{\text{эф}}$, $\beta_{\text{эф}}$, эффекты реактивности, спектральные индексы и пр.), исследовательских и энергетических реакторах (прежде всего постоблучательные эксперименты).

ОЦЕНКА ТОЧНОСТИ РАСЧЕТА НЕЙТРОННО-ФИЗИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК РБН

При оценке точности расчетного моделирования нейтронно-физических процессов учитывают результаты реакторно-физических экспериментов [14]. Общедоступные данные по реакторным экспериментам содержатся в международных справочниках АЯЭ ОЭСР по критическим экспериментам в обоснование ядерной безопасности (ICSBEP) и по экспериментам в области физики реакторов (IRPhEP) [6, 7]. На основании анализа размещенной в справочниках информации и данных по результатам измерений на различных критических сборках можно сделать вывод, что наиболее близкой к рассматриваемой модели РБН является критическая сборка БФС-61. На трех критических конфигурациях БФС-61, собранных из гетерогенных композиций реакторных материалов (плутоний, обедненный уран, графит и свинец), была выполнена серия измерений по изучению нейтронно-фи-

зических характеристик реакторных установок со свинцовым теплоносителем, таких как критические параметры, коэффициенты реактивности, отношения скоростей реакций деления и захвата для различных материалов (конструкционные и топливные материалы, минорные актиниды) и пр. Сборки БФС-61 имели типовую компоновку активной зоны и отличались составом бокового отражателя – БФС-61-0 имела трехслойный боковой отражатель из свинца, стали и обедненной двуокиси урана; БФС-61-1 – двухслойный отражатель из свинца и обедненной двуокиси урана; БФС-61-2 – однослойный отражатель из обедненной двуокиси урана.

Оценка апостериорной константной погрешности (с учетом результатов интегральных измерений) была выполнена с помощью ПК ОНИКС [8]. Результаты оценки априорной (в данной работе априорная погрешность определяется как погрешность нейтронно-физических функционалов, обусловленная неопределенностью характеристик нейтронно-ядерных взаимодействий из файлов оцененных ядерных данных) и апостериорной (в отличие от априорной учитывает результаты интегральных измерений на критических стендах, нейтронно-физические свойства которых подобны целевым объектам) константных погрешностей и разброса в расчетных значениях, полученных с использованием различных наборов оцененных нейтронных данных, показаны на рис. 1. Рисунок демонстрирует, как уточнение нейтронных констант в пределах их погрешностей позволяет сократить расчетно-экспериментальные расхождения для рассмотренных интегральных экспериментов. В результате уточнения

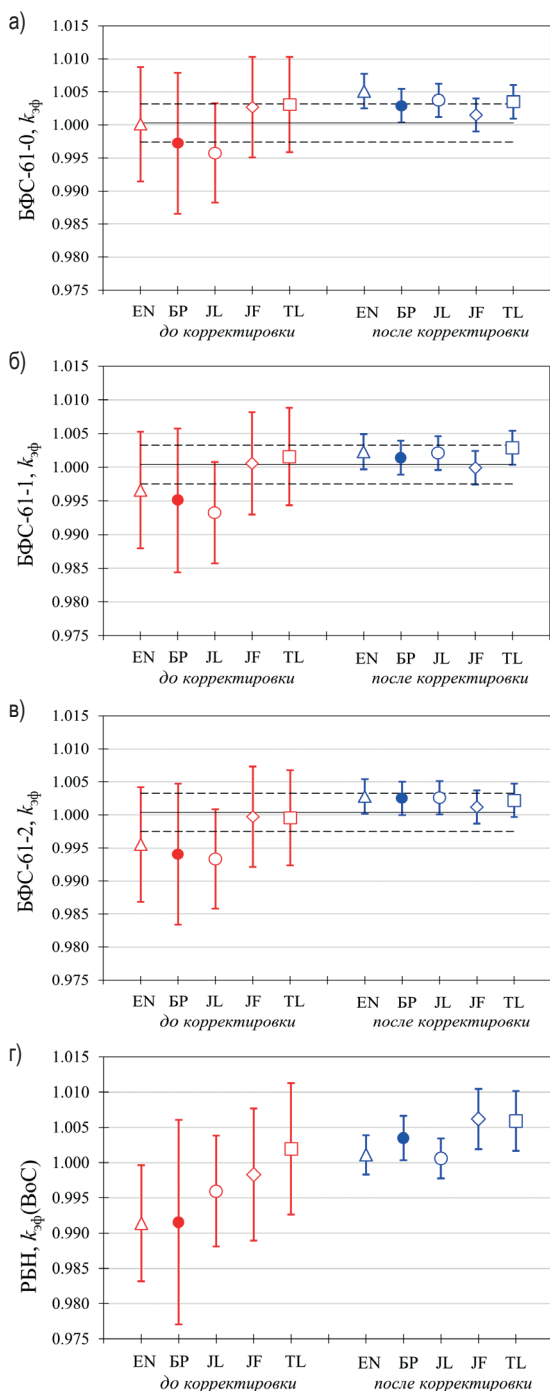


Рис. 1. Значения $k_{эф}$ до (красный цвет) и после (синий цвет) корректировки нейтронных констант для расчетов экспериментов (а) БФС-61-0, (б) БФС-61-1, (в) БФС-61-2 и (г) модели РБН, выполненных по библиотекам БРОНД 3.1 (BP), ENDF/B-VIII (EN), JENDL-5 (JL), TENDL 2021 (TL) и JEFF 4T (JF) (— экспериментальные значения $k_{эф}$, - - - погрешность измерений $\pm 1 \sigma$)

нейтронных констант по результатам интегральных измерений имеет место снижение как константной погрешности расчета целевых систем, так и разброса между значениями, полученными с использованием различных библиотек оцененных нейтронных данных.

В результате корректировки констант снижаются расчетно-экспериментальные расхождения (смещаются результаты расчетов экспериментов) и погрешности расчетов. При этом смещаются значения нейтронно-физических характеристик и их погрешности для рассматриваемой модели РБН. Если до корректировки констант разброс в расчетах $k_{эф}$ экспериментов БФС-61 составлял 0,6–0,8%, а в расчетах $k_{эф}$ (ВoС, хол.) модели РБН ~1%, то после корректировки констант этот разброс снизился до 0,2 – 0,4% и 0,6% для БФС-61 и модели РБН соответственно. Константная погрешность $k_{эф}$ после корректировки снизилась с 0,8–0,9% до 0,25% для БФС-61, а для модели РБН с 0,8–1,5% до 0,3–0,4%. Следует отметить, что после корректировки различные библиотеки нейтронных данных становятся «неразличимы» по качеству – они обеспечивают в среднем одинаковые расчетно-экспериментальные расхождения и погрешности расчетов.

В таблицах 4, 5 приведены данные по оцененной апостериорной (с учетом результатов интегральных измерений) константной погрешности критичности в начале и конце кампании, а также погрешность состава топлива на конец кампании, вычисленные для различных библиотек применительно к рассматриваемой модели РБН.

Таблица 4

Априорная и апостериорная константная погрешность $k_{эф}$ ВoС и $k_{эф}$ ЕoС для модели РБН

Параметр	Библиотека: БРОНД 3.1 (БР), ENDF/B-VIII (EN), JENDL-5 (JL), TENDL 2021 (TL) и JEFF 4T (JF)					Разброс в значениях*, %	
	БР	EN	JF	JL	TL	мин	макс
До корректировки							
$\delta k_{эф ВoС} (\delta\sigma), \%$	1.53	0.89	0.98	0.85	0.98	0.85	1.53
$\delta k_{эф ЕoС} (\delta\sigma), \%$	1.45	0.89	0.96	0.84	0.96	0.84	1.45
$\delta k_{эф} (\delta n_{ЕoС}), \%$	1.12	0.44	0.52	0.44	0.52	0.44	1.12
$\delta k_{эф ЕoС}, \%*$	1.83	0.99	1.09	0.95	1.09	0.95	1.83
После корректировки							
$\delta k_{эф ВoС} (\delta\sigma), \%$	0.32	0.28	0.42	0.28	0.42	0.28	0.42
$\delta k_{эф ЕoС} (\delta\sigma), \%$	0.35	0.31	0.45	0.32	0.45	0.31	0.45
$\delta k_{эф} (\delta n_{ЕoС}), \%$	0.79	0.35	0.48	0.35	0.47	0.35	0.79
$\delta k_{эф ЕoС}, \%$	0.85	0.45	0.64	0.45	0.63	0.45	0.85

*Суммарное значение равно корню квадратному из суммы квадратов компонент $\delta k_{эф ЕoС} (\delta\sigma)$ и $\delta k_{эф} (\delta n_{ЕoС})$

ТРЕБУЕМЫЕ И ДОСТИГНУТЫЕ ТОЧНОСТИ ОЦЕНЕННЫХ НЕЙТРОННЫХ ДАННЫХ

Начиная с 1970-х годов происходит формирование и последующая поэтапная актуализация потребностей в уточнении нейтронных данных для расчетов РБН в свете постоянно ужесточающихся требований к точности расчетного предсказания основных реакторных характеристик. В ранних работах [14] достигнутые и требуемые точности нейтронных данных оценивались и формировались из условия обеспечения целевых точностей расчета КВ и $k_{эф}$ в 2 и 1% соответственно применительно к РБН на оксидном

**Апостериорная константная погрешность состава топлива
на конец кампании для модели РБН**

Нуклид	Библиотека: БРОНД 3.1 (БР), ENDF/B-VIII (EN), JENDL-5 (JL), TENDL 2021 (TL) и JEFF 4T (JF) ($\delta n_{\text{ЕОС}}$, %)					Разброс в погрешностях, %	
	БР	EN	JF	JL	TL	мин	макс
^{234}U	3	2	4	3	4	2	4
^{235}U	0.8	0.8	1.4	0.4	1.5	0.4	1.5
^{236}U	5	4	7	2	7	2	7
^{238}U	0.23	0.09	0.10	0.09	0.10	0.1	0.2
^{237}Np	2	2	2	1.3	4	1.3	4
^{238}Pu	4	1.2	7	4	7	1.2	7
^{239}Pu	1.5	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	1.5
^{240}Pu	1.2	1.4	3	1.2	2	1.2	3
^{241}Pu	3	2	13	4	13	2	13
^{242}Pu	1.0	1.2	1.4	1.3	1.4	1.0	1.4
^{241}Am	3	1.1	6	2	6	1.1	6
$^{242\text{m}}\text{Am}$	6	4	8	5	34	4	34
^{243}Am	7	4	9	10	5	4	10
^{242}Cm	6	2	8	5	8	2	8
^{243}Cm	20	23	30	23	62	20	62
^{244}Cm	8	6	13	14	8	6	14
^{245}Cm	19	25	17	28	14	14	28

уран-плутониевом топливе с натриевым теплоносителем (см. табл. 1). В соответствующих расчетах (решение условной нелинейной оптимизационной задачи) использовались диагонализированные матрицы погрешностей нейтронных констант (без прямого учета кросс-корреляций по энергии между сечениями), и, следовательно, определяемые таким образом требуемые точности нейтронных данных следует считать завышенными (например, в работе [5] 1984 г. требуемые погрешности однокрупных сечений деления ^{239}Pu и ^{241}Pu , обеспечивающие погрешность оценки $k_{\text{эф}}$ в 1%, оценены в 4 и 8% соответственно).

В более поздних работах [15] (2006 г.) было продемонстрировано, что прямой учет кросс-корреляций по энергии между нейтронными сечениями актинидов, определенных на основании актуальных экспериментальных данных, применительно к задаче оценки погрешности критичности для реакторных установок типа SFR и LFR (РБН с натриевым и свинцовым теплоносителями западного дизайна) позволяет обеспечить точность расчета критичности в 0,3–0,4% даже в случае, если погрешности однокрупных сечений деления ^{239}Pu и ^{241}Pu будут составлять 5 и 10% соответственно. Отмеченное обстоятельство указывает на важность корректного учета корреляционных свойств погрешностей нейтронных данных при оценке целевых точностей реакторных параметров.

В таблице 6 приводятся данные по достигнутым на текущий момент точностям однокрупных нейтронных сечений актинидов (свертки со спектром нейтронов для рассмотренной модели РБН), оцененные по актуальным версиям различных зарубежных библиотек (ENDF/B-VIII.0, JEFF-3.3, JENDL-4.0u TENDL-2019) и отечественной библиотеке

Достигнутые и требуемые точности нейтронных данных ядер актинидов

Нуклид	Настоящая работа		Работа [5]			Настоящая работа		Работа [5]		
	MT=102 (сечение радиационного захвата)					MT=18 (сечение деления)				
	1	2	требуемая*	достигнутая	требуемая	1	2	требуемая	достигнутая	требуемая
²³⁸ U	2	4	<0.5**	8	8	2	6	1	5	4
²³⁸ Pu	31	14	10	–	–	5	3	3	–	–
²³⁹ Pu	4	7	2	10	4	0.8	1.2	<0.5	4	4
²⁴⁰ Pu	12	8	<5	20		3	6	2	10	10
²⁴¹ Pu	10	10			7	3	2	<3	8	5
²⁴² Pu	7	17	<10	50	15	3	5		30	30
^{242m} Am	44	17		30	20	24	6	5		
²⁴¹ Am	6	11	5	15	15	4	8	3	15	15
²⁴² Am	44	17	<10	30	30	24	6	<5	30	30
²⁴³ Am	8	26		50	20	4	5		50	50
²⁴³ Cm	40	56	<20	–	–	6	3	<5	–	–
²⁴⁴ Cm	18	51				7	9			
²⁴⁵ Cm	33	34				3	3			
²³⁷ Np	10	10	<10	50	15	3	2	<3	10	10
ПД	12	–	30	–						

1 – Среднее значение погрешности по библиотекам ENDF/B-VIII.0, JEFF-3.3, JENDL-4.0u TENDL-2019 и БРОНД-3.1;
 2 – Разброс значений одногрупповых сечений по библиотекам ENDF/B-VIII.0, JEFF-3.3, JENDL-4.0u TENDL-2019 и БРОНД-3.1;
 * – требуемая точность получена из условия $\delta k_{эф}(\delta n_{Еос}) < 0.2\%$;
 ** – при условии отсутствия корреляций между различными реакциями (погрешности округлены)

БРОНД-3.1. Поскольку оценки ковариационных матриц и, как следствие, одногрупповых нейтронных сечений сильно различаются (в разы), в табл. 6 приводятся как средние значения погрешностей, так и разброс значений одногрупповых сечений, вычисленные по рассмотренным библиотекам. Требуемые точности (см. табл. 6) получены в результате решения «обратной» задачи по определению целевых точностей с использованием ПК ОНИКС в предположении, что нейтронные константы должны обеспечить точность расчета $k_{эф}$ для модели РБН на уровне не более 0,2% [8].

Как можно видеть из табл.6, по наиболее важным с точки зрения оценки точности расчета $k_{эф}$ РБН актинидам погрешности их нейтронных сечений, обозначенные как «требуемые» в работе 1984 г., на текущий момент достигнуты за счет прогресса в области эксперимента и оценки нейтронных данных. Таким образом, на сегодняшний день априорная (оцененная на основе ковариационных матриц погрешностей нейтронных данных без учета результатов интегральных измерений) погрешность $k_{эф}$ РБН соответствует целевой на момент 1984 г. погрешности примерно в 1%. Однако, учитывая тот факт, что на текущий момент требуемая точность расчета $k_{эф}$ РБН с уран-плутониевым топливом составляет порядка 0,2–0,3%, достигнутые точности нейтронных данных нельзя считать достаточными.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Основные наблюдения по проделанной работе представлены в двух разрезах: 1 – влияние оцененных нейтронных данных из различных библиотек на точность расчета основных нейтронно-физических характеристик РБН; 2 – возможности повышения точности расчетных предсказаний нейтронно-физических характеристик РБН посредством учета результатов интегральных измерений.

1. Влияние оцененных нейтронных данных из различных библиотек на точность расчета основных нейтронно-физических характеристик РБН.

Во всех проанализированных библиотеках оцененных нейтронных данных есть необходимые данные для выполнения оценок неопределенности критичности стартовой загрузки РБН (холодное состояние). Вместе с тем нет ни одной библиотеки, где был бы полный набор данных по погрешностям, необходимых для оценки неопределенности таких важных стационарных нейтронно-физических функционалов как доплеровский коэффициент реактивности и эффективная доля запаздывающих нейтронов. Так, например, во всех библиотеках для ^{238}U отсутствует секция MF32, необходимая для оценки погрешности факторов резонансной самоэкранировки и доплеровских приращений. Только в библиотеке JENDL есть ковариационные матрицы погрешностей (секция MF = 31) для среднего числа мгновенных и запаздывающих нейтронов ν , испускаемых на один акт деления (MT = 452, 455, 456) для ^{239}Pu , являющегося основным вкладчиком в неопределенность $\beta_{\text{эф}}$ РБН с уран-плутониевым топливом.

Для оценок неопределенности параметров точечной кинетики во всех проанализированных библиотеках отсутствуют ковариационные данные по постоянным распада ядер-предшественников запаздывающих нейтронов λ_i и долям выходов запаздывающих нейтронов β_i .

Для оценок неопределенности в задачах нуклидной кинетики также нет полного набора данных по погрешностям нейтронных данных – в библиотеках приводятся только данные по погрешностям (без корреляций), по постоянным распада и выходам продуктов деления. Отсутствуют данные для оценки погрешности коэффициентов ветвления (ковариационные данные для сечений образования изомеров). Из всех рассмотренных библиотек только в TENDL имеются все необходимые данные для оценки неопределенности нейтронных сечений всех ПД (в остальных библиотеках список ПД, для которых имеются ковариационные данные, ограничен).

В условиях отсутствия необходимых ковариационных данных в библиотеках для прямой оценки константной погрешности расчета наиболее важных нейтронно-физических характеристик РБН в качестве эрзац-подхода может использоваться определение разброса в оценках соответствующих характеристик с использованием нейтронных данных из различных библиотек.

Наблюдаются большие разбросы в значениях (для сечения захвата Am и Cm разбросы превышают 50%) и погрешностях (погрешности отличаются в разы) одnogрупповых нейтронных сечений минорных актиноидов, усредненных со спектром нейтронов РБН.

Выполненные расчеты и оценки неопределенности демонстрируют, что библиотеки ENDF и JENDL, а также JEFF и TENDL обеспечивают близкие результаты, что объясняется тем, что нейтронные сечения в быстрой области энергий и резонансные параметры для основных топливных нуклидов (^{235}U , ^{238}U и ^{239}Pu) в каждой группе библиотек идентичны.

Значения априорной погрешности критичности для стартовой загрузки (холодное состояние), оцененные по зарубежным библиотекам, лежат в пределах 0,9–1%, а для БРОНД 3.1 составляет 1,5%. Значения априорной погрешности критичности на конец кампании (900 сут), оцененные по зарубежным библиотекам, лежат в пределах 0,9–1,2%, а для БРОНД 3.1 составляет 1,8%. Разбросы в самих значениях критичности для всех рассмотренных состояний, рассчитанных по различным библиотекам, составляют ~1–1,5%.

2. Возможности повышения точности расчетных предсказаний нейтронно-физических характеристик РБН посредством учета результатов интегральных измерений.

За последние 40 лет значительно повысились точности расчета основных реакторных характеристик РБН (в среднем в два раза снизились все неопределенности) – достигнутые к настоящему времени точности соответствуют значениям целевых точностей, определенных несколько десятилетий назад.

Выполненные оценки демонстрируют, что для достижения целевой точности расчета $k_{эф}$ на уровне 0,2% без учета интегральных экспериментов необходимо существенное снижение погрешностей нейтронных сечений (в 7–10 раз), что не всегда может быть осуществлено путем проведения большого числа дифференциальных измерений (измерения нейтронных сечений) из-за ограничений измерительных методик (аппаратуры). На данный момент не представляется возможным значительно снизить погрешности нейтронных сечений основных вкладчиков в константную погрешность нейтронно-физических характеристик (^{238}U и ^{239}Pu), поэтому возрастает роль интегральных экспериментов с уран-плутониевым топливом как единственного реального способа повышения точности расчетных предсказаний нейтронно-физических характеристик РБН.

Значительного снижения неопределенности расчетов нейтронно-физических характеристик можно достичь путем реализации процедуры усвоения экспериментальных реакторно-физических данных, которая позволяет учесть информацию об интегральных измерениях, выполненных на критических стендах. Так учет критических экспериментов серии БФС-61 позволяет в два раза снизить погрешности критичности стартовой загрузки (холодное состояние) с 1 до 0,5% и критичности на конец кампании с 1,2 до 0,6%. При этом также в два раза уменьшается разброс в значениях критичности, вычисленных по зарубежным библиотекам, с 1,4 до 0,6%. На погрешность критичности на конец кампании заметно влияет неопределенность в нуклидном составе тяжелых ядер облученного топлива, обусловленная в основном неопределенностью однопиковых сечений деления и захвата актинидов (погрешность выходов и сечений захвата ПД не вносит существенного вклада в погрешность критичности на конец кампании).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе на примере упрощенной модели РБН с плотным уран-плутониевым топливом и тяжелым жидкометаллическим теплоносителем проведен анализ влияния различных библиотек оцененных нейтронных данных (ENDF/B-VIII, JENDL-5, TENDL-2021, JEFF-4T1 и БРОНД-3.1) на точность расчета основных нейтронно-физических характеристик. Полученные результаты свидетельствуют о том, что погрешности определения ключевых реакторных функционалов, таких как эффективный коэффициент размножения, эффективная доля запаздывающих нейтронов, доплеровский эффект реактивности, коэффициент воспроизводства и запас реактивности на выгорание, снизились по сравнению с результатами, полученными с использованием предыдущих релизов библиотек. Это свидетельствует

о прогрессе в области оценки нейтронных данных. Анализ целевых точностей расчета нейтронно-физических характеристик РБН, декларируемых в течение последних десятилетий, показал необходимость дальнейшего повышения точности оцененных нейтронных данных. В работе дана оценка требований к точностям нейтронных данных, необходимых для достижения заявленных целевых точностей.

Важным направлением повышения точности расчетных предсказаний нейтронно-физических характеристик РБН является учет результатов интегральных измерений. Данный подход позволяет проводить валидацию и уточнение как расчетных моделей, так и самих библиотек оцененных нейтронных данных. Дальнейшие исследования в области оценки нейтронных данных, совершенствование расчетных кодов и проведение реперных интегральных экспериментов являются ключевыми факторами для повышения надежности и безопасности перспективных РБН.

Благодарности

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-29-10154.

Литература

1. Официальный сайт Evaluated Nuclear Data File (ENDF). Электронный ресурс: <https://www-nds.iaea.org/exfor/endl.htm> (дата доступа: 31.12.2023).
2. Официальный сайт WPEC subgroup 46 «Efficient and effective use of integral experiments for nuclear data validation». Электронный ресурс: <https://www.oecd-nea.org/download/wpec/sg46/> (дата доступа 31.12.2023).
3. Cabellos O., Hursin M., Palmiotti P. WPEC/SG46 Exercise on target accuracy requirement. / EPJ Web of Conferences, EDP Sciences. – 2023. – V. 284. – P. 4.
4. Castelluccio D. M., Grasso G., Lodi F., Peluso V. Assessment of nuclear data target accuracy requirements for ALFRED. / Proceedings of the International Conference on Physics of Reactors 2022 (PHYSOR 2022), Pittsburgh, PA, May 15-20. – 2022. – PP. 1085–1094.
5. Манохин В.Н., Усачев Л.Н. Потребности в ядерных данных для быстрых реакторов. // Атомная энергия. – 1984. – Т.57. – Вып. 4. – С. 234–240. Электронный ресурс: https://elib.biblioatom.ru/text/atomnaya-energiya_t57-4_1984/p234/ (дата доступа 31.12.2023).
6. OECD Nuclear Energy Agency. Database for ICSBEP (DICE). Электронный ресурс: <https://www.oecd-nea.org/dice/webstart/dice.jnlp> (дата доступа 31.12.2023).
7. OECD Nuclear Energy Agency. International Reactor Physics Handbook Database and Analysis Tool (IDAT). Электронный ресурс: <https://www.oecd-nea.org/idat/webstart/IDAT.jnlp> (дата доступа 31.12.2023).
8. Андрианов А.А., Андрианова О.Н., Коровин Ю.А., Купцов И.С., Спиридонова А.А. Программный комплекс оптимизации параметров нейтронно-физических моделей с учетом результатов интегральных экспериментов. // Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2023. – № 2. – С. 148–161. DOI: <https://doi.org/10.26583/npe.2023.2.12>
9. Бычков С.А., Варфоломеева В.А., Грушин Н.А., Иванов И.Е., Андрианова О.Н. Решение задач нуclidной кинетики в программе MNT-CUDA. / Нейтронно-физические проблемы атомной энергетики: тезисы научно-технической конференции (28–31 мая 2024 г., Обнинск). Обнинск. – 2024. – С. 79.
10. Баловнев А.В., Давыдов В.К., Жирнов А.П., Моисеев А.В., Солдатов Е.О. Моделирование топливного цикла реактора на быстрых нейтронах со свинцовым теплоносителем. // Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2021. – № 4. – С. 66–75. DOI: <https://doi.org/10.26583/npe.2021.4.06>

11. Андрианов А.А., Купцов И.С., Осипова Т.А., Спиридонова А.А., Андрианова О.Н., Утянская Т.В. Пакет прикладных программ моделирования ядерно-энергетических систем: обзор функционала и примеры применения. // Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2022. – № 2. – С. 148–160. DOI: <https://doi.org/10.26583/npe.2022.2.14>.

12. Андрианов А.А., Андрианова О.Н., Головки Ю.Е., Купцов И.С., Ломаков Г.Б., Спиридонова А.А. Тестирование современных оценок нейтронных данных в задаче определения точности расчетов нейтронно-физических характеристик модели быстрого реактора с тяжелым жидкометаллическим теплоносителем / Депонированная рукопись № 14-B2023 24.05.2023. DOI: 10.36535/0202-6120-2023-02-14-2023

13. Андрианова О.Н., Головки Ю.Е., Жердев Г.М., Задорнов Д.В., Кошечев В.Н., Мантуров Г.Н., Перегудов А.А., Цибуля А.М. Тестирование ковариационных матриц погрешностей системы констант БНАБ. // Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2014. – № 2. – С. 109–117. DOI: <https://doi.org/10.26583/npe.2014.2.12>

14. Усачев Л.Н., Бобков Ю.Г. Теория возмущений и планирование эксперимента в проблеме ядерных данных для реакторов: серия «Физика ядерных реакторов», М.: Атомиздат, 1980. – С. 88.

15. Uncertainty and target accuracy assessment for innovative systems using recent covariance data evaluations / A Report by the Working Party on International Evaluation Co-operation of the Nuclear Science Committee. – 2008.

Поступила в редакцию 09.01.2024

Авторы

Андрианов Андрей Алексеевич, доцент, к.т.н.,

E-mail: andreyandrianov@yandex.ru

Андрианова Ольга Николаевна, научный консультант, к.т.н.,

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

Купцов Илья Сергеевич, доцент, к.ф.-м.н.,

E-mail: kuptsov_ilia@list.ru

Уварова Анастасия Алексеевна, инженер,

E-mail: aaspiridonova@mephi.ru

UDC 621.039.51

Comparison of the Calculation Accuracy of the Neutronics Characteristics of a Heavy Liquid Metal Cooled Fast Reactor Model Using the Various Evaluated Neutron Data Libraries

Andrianov A.A., Andrianova O.N., Kuptsov I.S., Uvarova A.A.

IATE MEPHI,

1 Studgorodok, 249039 Obninsk, Kaluga reg., Russia

Abstract

The paper analyses the neutron data and covariance matrixes, which are crucial for the calculation prediction of the neutronics characteristics of fast neutron reactors with uranium-plutonium fuel and currently available in the state-of-the-art versions of evaluated nuclear data libraries: ENDF/B-VIII, JENDL-5, TENDL 2021, JEFF 4T1. The newly obtained covariance data are compared to the data that was presented in the Russian evaluated nuclear data library BROND 3.1. A simplified model of a fast neutron reactor with mixed dense nitride uranium-plutonium fuel and a heavy liquid metal coolant was applied to calculate the spread of neutronics characteristic values and their uncertainties due to neutron data using various evaluated nuclear data libraries for the following characteristics: effective multiplication factor, effective delayed neutron fraction,

Doppler reactivity coefficient, breeding ratio and gain, reactivity margin for fuel burnup and other fuel burnup characteristics. It has been observed that, on the whole, the uncertainties of the reactor functionals have decreased when estimated using state-of-the-art versions of the evaluated neutron data libraries, compared to previous releases of those libraries. The article also examines the changes in target accuracies for predicting the main neutronics characteristics of fast neutron reactors over the past decades, as well as evaluates the requirements for neutron data uncertainties to achieve the recently declared target accuracies. The main findings of this study are presented in two aspects: firstly, in terms of the effects evaluated neutron data from different libraries have on the accuracy of calculations for the primary neutronics characteristics of fast reactors; and secondly, in terms of the potential for improving the accuracy of predicted neutronics characteristics of fast reactors by considering the results of reactor physics measurements.

Keywords: evaluated neutron data, uncertainties, covariance matrices, fast neutron reactor, sensitivity coefficient, uncertainty, data assimilation.

For citation: Andrianov A.A., Andrianova O.N., Kuptsov I.S., Uvarova A.A. Comparison of the Calculation Accuracy of the Neutronics Characteristics of a Heavy Liquid Metal Cooled Fast Reactor Model Using the Various Evaluated Neutron Data Libraries. *Izvestiya vuzov. Yadernaya Energetika*. 2024, no. 3, pp. 109–124; DOI: <https://doi.org/10.26583/npe.2024.3.09> (in Russian).

References

1. Official website of Evaluated Nuclear Data File (ENDF). Available at: <https://www-nds.iaea.org/exfor/endl.htm> (accessed Dec. 31, 2023).
2. Official website of WPEC subgroup 46 «Efficient and effective use of integral experiments for nuclear data validation». Available at: <https://www.oecd-nea.org/download/wpec/sg46/> (accessed Dec. 31, 2023).
3. Cabellos O., Hursin M., Palmiotti P. WPEC/SG46 Exercise on Target Accuracy Requirement. *In EPJ Web of Conf., EDP Sciences*, 2023, V. 284, p. 4.
4. Castelluccio D. M., Grasso G., Lodi F., Peluso V. Assessment of nuclear data target accuracy requirements for ALFRED. *In Proc. of the Inter. Conf. on Phys. of Reactors 2022 (PHYSOR 2022)*, Pittsburgh, PA. May 15–20 2022, pp. 1085–1094.
5. Manokhin V.N., Usachev L.N. Nuclear data requirements for fast reactors. *Atomic Energy*. 1984, vol. 57, iss. 4, p. 683–692. DOI: <https://doi.org/10.1007/BF01123637>
6. Database for ICSBEP (DICE). NEA/OECD Web-site. Available at: <https://www.oecd-nea.org/dice/webstart/dice.jnlp> (accessed Dec. 31, 2023).
7. International Reactor Physics Handbook Database and Analysis Tool (IDAT). Web-site NEA/OECD. Available at: <https://www.oecd-nea.org/idat/webstart/IDAT.jnlp> (accessed Dec. 31, 2023).
8. Andrianov A.A., Andrianova O.N., Korovin Yu.A., Kuptsov I.S., Spiridonova A.A. A computer code for optimizing the neutronic model parameters based on results of integral experiments. *Izvestiya vuzov. Yadernaya Energetika*. 2023, no. 2, pp. 148–161. DOI: <https://doi.org/10.26583/npe.2023.2.12> (in Russian).
9. Bychkov S.A., Varfolomeeva V.A., Grushin N.A., Ivanov I.E., Andrianova O.N. Nuclide kinetics problems solution using MNT-CUDA. Neutron-physical problems of atomic energy: Abstracts of the scientific and technical conference, p. 79., May 28-31. Obninsk, 2024 (in Russian).
10. Balovnev A.V., Davydov V.K., Zhirnov A.P., Moiseev A.V., Soldatov E.O. Modeling the top-feeding cycle of a lead-cooled fast reactor. *Izvestiya vuzov. Yadernaya Energetika*, 2021, no. 4, pp. 66–75. DOI: <https://doi.org/10.26583/npe.2021.4.06> (in Russian)

11. Andrianov A.A., Kuptsov I.S., Osipova T.A., Spiridonova A.A., Andrianova O.N., Utyanskaya T.V. Nuclear energy system modelling application package: functional overview and examples. *Izvestiya vuzov. Yadernaya Energetika*. 2022, no. 2, pp. 148–160. DOI: <https://doi.org/10.26583/npe.2022.2.14> (in Russian).
12. Andrianov A.A., Andrianova O.N., Golovko Y.E., Kuptsov I.S., Lomakov G.B., Spiridonova A.A. Testing modern evaluations of neutron data accuracy in the problem of determining the accuracy of calculations of neutron-physical characteristics of a fast reactor model with a heavy liquid metal coolant. *Manuscript deposited at VINITI*, Deposition № 14-V2023 24.05.2023. DOI: 10.36535/0202-6120-2023-02-14-2023 (in Russian).
13. Andrianova O.N., Golovko Yu. E., Zherdev G.M., Zadornov D.V., Koscheev V.N., Manturov G.N., Peregodov A.A., Tsibulya A.M. Testing covariance matrices of uncertainties in the BNAB data system. *Izvestiya vuzov. Yadernaya Energetika*. 2014, no. 2, pp. 109–117; DOI: <https://doi.org/10.26583/npe.2014.2.12> (in Russian).
14. Usachev L.N., Bobkov Yu.G. Perturbation theory and experiment planning in the problem of nuclear data for reactors, *Atomizdat*, Moscow, 1980, p. 88 (in Russian).
15. Uncertainty and target accuracy assessment for innovative systems using recent covariance data evaluations. A Report by the Working Party on International Evaluation Co-operation of the Nuclear Science Committee, 2008.

Authors

Andrey A. Andrianov, Associate Professor, Cand. Sci. (Engineering),

E-mail: andreyandrianov@yandex.ru

Olga N. Andrianova, Scientific consultant, Cand. Sci. (Engineering),

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

Ilya S. Kuptsov, Associate Professor, Cand. Sci. (Phys.-Math.),

E-mail: kuptsov_ilia@list.ru

Anastasia A. Uvarova, Engineer,

E-mail: aaspiridonova@mephi.ru