

ЯДЕРНАЯ, РАДИАЦИОННАЯ И  
ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ  
NUCLEAR, RADIATION AND  
ENVIRONMENTAL SAFETY

<https://doi.org/10.26583/gns-2026-03-03>

УДК 621.039.51

EDN FTDBEN

Оригинальная статья / Original paper



**Кросс-верификация расчетного моделирования критических экспериментов БФС-97 и анализ влияния технологических и константных неопределенностей на коэффициент размножения**

**М.З. Буркеев , Р.А. Внуков  , В.В. Колесов **

*Обнинский институт атомной энергетики – филиал Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ», отделение ядерной физики и технологий, г. Обнинск, Калужская обл., Российская Федерация  
 [vnukovra@oiate.ru](mailto:vnukovra@oiate.ru)*

**Резюме.** Выполнена кросс-верификация расчетного моделирования критических сборок БФС-97 и оценено влияние технологических неопределенностей и выбора библиотеки ядерных данных на эффективный коэффициент размножения. Для конфигураций БФС-97-1–БФС-97-4 построены гетерогенные модели в коде Serpent 2 с библиотеками JEFF-3.1.1, JEFF-3.3 и ENDF/B-VII.1. Рассчитаны абсолютные значения  $k_{\text{eff}}$ , температурные эффекты реактивности и межбиблиотечные сдвиги. Температурный отклик сопоставлен с результатами расчетов, выполненных детерминистическим кодом TRIGEX, а причины различий между библиотеками исследованы однопараметрической заменой сечений отдельных нуклидов. В качестве критерия воспроизведения использована полная технологическая неопределенность эталонного эксперимента. Для сборки БФС-97 полная неопределенность  $k_{\text{eff}}$  составляет 0,26-0,31 %, причем основной вклад вносит геометрия. Температурный эффект при изменении температуры от 314 до 329 К возрастает по модулю примерно от 18 pcm для БФС-97-1 до 63-64 pcm для БФС-97-3 и БФС-97-4. Для БФС-97-3 и БФС-97-4 результаты Serpent согласуются с оценками TRIGEX в пределах  $2-3\sigma(\Delta\rho)$ ; для БФС-97-1 и БФС-97-2 совпадают знак и порядок величины эффекта, однако расхождение превышает  $3\sigma(\Delta\rho)$ . Для конфигурации БФС-97-4 межбиблиотечный разброс абсолютного  $k_{\text{eff}}$  достигает 0,2-0,9 % и становится сопоставимым с технологической неопределенностью эксперимента или превышает ее. Нуклидная декомпозиция показывает, что основной вклад в расхождения дают сечения  $^{238}\text{U}$  и  $^{239}\text{Pu}$ . Установлено, что дифференциальный температурный эффект значительно устойчивее к выбору библиотеки, чем абсолютная критичность. Воспроизводимость расчета для валидационных задач следует оценивать относительно полной неопределенности эталонного эксперимента, а не только относительно статистической погрешности метода Монте-Карло.

**Ключевые слова:** БФС-97, Serpent, неопределенности, технологические погрешности, ядерные данные, JEFF, ENDF, кросс-верификация, чувствительность,  $k_{\text{eff}}$

**Для цитирования:** Буркеев М.З., Внуков Р.А., Колесов В.В. Кросс-верификация расчетного моделирования критических экспериментов БФС-97 и анализ влияния технологических и константных неопределенностей на коэффициент размножения. *Глобальная ядерная безопасность*. 2026;16(3):27-37. <https://doi.org/10.26583/gns-2026-03-03>

**For citation:** Burkeev M.Z., Vnukov R.A., Kolesov V.V. Cross-verification of computational modeling of BFS-97 critical experiments and impact analysis of technological and nuclear-data uncertainties on the multiplication factor. *Nuclear Safety*. 2026;16(3):27-37. (In Russ.). <https://doi.org/10.26583/gns-2026-03-03>

**Cross-verification of computational modeling of BFS-97 critical experiments and impact analysis of technological and nuclear-data uncertainties on the multiplication factor**

**Mars Z. Burkeev** , **Ruslan A. Vnukov**  , **Valery V. Kolesov** *Obninsk Institute for Nuclear Power Engineering the Branch of National Research Nuclear University «MEPhI»,  
Department of Nuclear Physics and Technologies, Obninsk, Kaluga region, Russian Federation,  
 vnukovra@oiate.ru*

**Abstract.** Cross-verification of computational models of the BFS-97 critical assemblies is performed, and the effects of technological uncertainties and nuclear data library selection on the effective multiplication factor are assessed. Heterogeneous Serpent 2 models are developed for the BFS-97-1 through BFS-97-4 configurations using the JEFF-3.1.1, JEFF-3.3, and ENDF/B-VII.1 libraries. Absolute  $k_{\text{eff}}$  values, temperature reactivity effects, and inter-library shifts are calculated. The temperature response is compared with results obtained using the deterministic TRIGEX code with the BNAB-93 multigroup constants, while the origins of library-dependent differences are examined by one-at-a-time replacement of individual nuclide cross sections. The total technological uncertainty of the benchmark experiment is used as the reproducibility criterion. The calculations show that the total  $k_{\text{eff}}$  uncertainty for the BFS-97 assemblies is 0.26-0.31 %, with geometry providing the dominant contribution. As temperature increase from 314 to 329 K, the magnitude of the reactivity effect rises from approximately 18 pcm for BFS-97-1 to 63–64 pcm for BFS-97-3 and BFS-97-4. The Serpent and TRIGEX results agree within  $2-3\sigma(\Delta\rho)$  for BFS-97-3 and BFS-97-4; the sign and order of magnitude agree, but the difference exceeds  $3\sigma(\Delta\rho)$  for BFS-97-1 and BFS-97-2., the inter-library spread in absolute  $k_{\text{eff}}$  reaches 0.2-0.9 %, making it comparable to or greater than the technological uncertainty of the experiment for BFS-97-4. Nuclide decomposition identifies the  $^{238}\text{U}$  and  $^{239}\text{Pu}$  cross sections as the main contributors to the discrepancies. It is found that the differential temperature effect is substantially less sensitive to the library choice than absolute criticality. Calculation reproducibility should therefore be judged against the complete uncertainty of the benchmark experiment rather than against the Monte Carlo statistical error alone.

**Keywords:** BFS-97, Serpent, uncertainties, technological uncertainties, nuclear data, JEFF, ENDF, cross-verification, sensitivity,  $k_{\text{eff}}$

## Введение

Воспроизводимость критических экспериментов расчетными кодами является необходимым условием валидации нейтронно-физических моделей и библиотек ядерных данных, используемых при обосновании безопасности ядерных установок. Без согласованного перечня [1, 2] неопределенностей сравнение расчета и эксперимента остается формальным: если изучаемый эффект сопоставим с погрешностью экспериментального моделирования или меньше ее, подтвердить наличие либо отсутствие эффекта практически невозможно; когда же эффект превышает эту погрешность, корректное воспроизведение выдвигает проблему выбора константного обеспечения и точности описания технологической конфигурации стенда.

Погрешности расчета нейтронно-физических характеристик принято разделять на константную (связанную с неопределенностями оцененных сечений и ковариаций), методическую (приближения транспортной модели, обработки сечений, статистики Монте-Карло) и технологическую (несоответствие реальной сборки идеализированной модели по составу, размерам и температуре). Именно технологическая составляющая определяет «окно», в котором

можно говорить о воспроизведении эксперимента, а константная – о том, насколько выбор библиотеки способен сместить результат за пределы этого окна.

Для тепловых и смешанных систем неопределенности особенно критичны. Смягчение спектра увеличивает роль резонансного поглощения  $^{238}\text{U}$ , термализации на водороде и сечений деления/захвата  $^{239}\text{Pu}$  в области, где экспериментальная база дифференциальных измерений и согласованность оценок между библиотеками исторически менее однородны, чем в чисто быстром спектре. Поэтому даже при корректной геометрии модели малые вариации температуры, состава полиэтилена или выбора файла сечений могут дать заметный сдвиг  $k_{\text{eff}}$ . Актуализация диапазонов неопределенностей нужна не как формальность оформления бенчмарка, а как условие корректного ответа на вопрос: воспроизводим ли мы эксперимент данным кодом и данной библиотекой.

Кросс-верификация в данном контексте понимается как независимое сопоставление результатов, полученных разными кодами и/или разными наборами ядерных данных, с опорой на один и тот же экспериментальный бенчмарк. Такой подход повышает достоверность оценки суммарной неопреде-

ленности и помогает выявить систематические ошибки исходных данных или моделирования. Если два независимых расчета согласуются между собой и с экспериментом в пределах технологической неопределенности, вывод о воспроизведении становится существенно надежнее, чем при опоре на единственный код и единственную библиотеку.

Методология оценки неопределенностей критических бенчмарков систематизирована в международном руководстве по выражению неопределенностей критических экспериментов [1]: массы и составы материалов, геометрия (размеры и взаимное положение элементов), температура и избыток реактивности вносят вклады в  $\sigma(k_{\text{eff}})$ , которые при линейности отклика суммируются в квадратуре. Аналогичный подход для реакторно-физических экспериментов изложен в руководстве по выражению неопределенностей реакторно-физических экспериментов [2]. Важный вывод этих документов состоит в том, что неопределенность «близости к критичности» часто оказывается одной из наименьших, тогда как состав и геометрия доминируют. Практика оценки критических бенчмарков подтверждает: без полноценного учета всех неопределенностей оценка систематического смещения кода и сечений искажается, а эталонный эксперимент теряет ценность для улучшения ядерных данных [3].

Для серии сборок БФС-97/99/101 (гетерогенные композиции металлического плутония, обедненного диоксида урана и полиэтилена) детальный расчет неопределенностей приведен в оценке критических экспериментов этой серии в международном справочнике [4]. Для конфигураций БФС-97 полная неопределенность  $k_{\text{eff}}$  составляет 0,26-0,31 % ( $1\sigma$ ), причем основной вклад дает геометрия (высота зоны и повторяемость эксперимента), затем - материальный состав; температурная неопределенность  $\pm 15^\circ\text{C}$  вносит в  $\sigma(k_{\text{eff}})$  от  $\sim 0,01$  % (97-1) до  $\sim 0,06$  % (97-3/97-4). Эти величины задают естественный масштаб для суждения «воспроизводим / не воспроизводим». Родственные описания тех же экспериментов как реакторно-физических бенчмарков представлены в [5].

В литературе по технологическим неопределенностям сравнительно мало обзорных работ: тема раскрывается либо в методических руководствах по оценке критических и реакторно-физических экспериментов [1,2], либо в перечнях конкретных экспериментов. Примеры распространения технологических неопределенностей изготовления (радиус топлива, толщина зазора и оболочки) методом статистической выборки параметров модели показывают, что вклад геометрии в неопределенность размножения, как правило, меньше вклада ядерных данных, но не пренебрежим для валидации [6]. В отечественной нормативной практике подходы к оценке чувствительности и неопределенностей результатов расчетных анализов безопасности закреплены в руководстве по безопасности РБ-166-20<sup>1</sup>.

Константные неопределенности исследованы существенно шире. Детерминистический подход «коэффициенты чувствительности + ковариационные матрицы сечений» реализован, в частности, в специализированных модулях анализа чувствительности комплекса SCALE [7]. Альтернативой служит статистическое распространение неопределенностей ядерных данных путем многократных расчетов со случайными реализациями файлов сечений, сопоставляемое с методами теории возмущений [8]. Верификация ковариационных файлов JEFF-3.3 на большом наборе критических бенчмарков показывает, что для плутониевых систем со смешанным и промежуточным спектром неопределенность  $k_{\text{eff}}$ , обусловленная ядерными данными, может достигать существенных величин, а доминирующими вкладчиками часто оказываются реакции на  $^{239}\text{Pu}$  и  $^{238}\text{U}$  [9], особенно если выбирать составы с МОКС-топливом.

Обновления оценок актинидов между релизами библиотек напрямую влияют на предсказание критичности. В JEFF-3.3 пере-

<sup>1</sup> РБ-166-20. Рекомендации по оценке погрешностей и неопределенностей результатов расчетных анализов безопасности атомных станций: руководство по безопасности при использовании атомной энергии: утв. приказом Ростехнадзора от 30.07.2020 № 288. URL: [https://docs.secnrs.ru/catalog/RB/RB\\_166\\_20/](https://docs.secnrs.ru/catalog/RB/RB_166_20/) (дата обращения: 27.07.2026).

работаны файлы  $^{235}\text{U}$ ,  $^{238}\text{U}$  и  $^{239}\text{Pu}$  (в том числе резонансная и неразрешенная области  $^{239}\text{Pu}$ ) относительно JEFF-3.1.1 [10]; оценки ENDF/B-VII.0 и ENDF/B-VII.1 широко используются в межбиблиотечных сопоставлениях [11,12]. Для стенда БФС отечественные исследования подтверждают ценность интегральных экспериментов при верификации кодов и констант (отечественные и зарубежные библиотеки оцененных данных) и при оценке константной составляющей погрешности характеристик быстрых реакторов [13-15]. Обзор экспериментов на стенде БФС, включенных в международные справочники, дан в работе [5].

Отдельного внимания заслуживает сопоставление технологической и константной шкал. Если суммарная технологическая неопределенность для БФС-97 фиксирована на уровне около 0,3 %  $\delta k$ , то константная составляющая, оцениваемая либо межбиблиотечным разбросом, либо через ковариации, может быть того же порядка или больше – особенно в смешанном спектре, где чувствительность к  $^{239}\text{Pu}$  и  $^{238}\text{U}$  высока [9]. В этом случае «хорошее» согласие расчета с экспериментом на одной библиотеке и «плохое» на другой отражает не столько ошибку модели стенда, сколько неопределенность ядерных данных. Кросс-верификация несколькими библиотеками и кодами позволяет отделить эти эффекты.

Актуальность настоящей работы связана с развитием перспективных легководных

систем (в частности, концепций с регулированием реактивности через водо-топливное отношение и ужесточением спектра), для которых валидация на сборках со смешанным спектром типа БФС-97 приобретает повышенное значение. Цель работы – выполнить кросс-верификацию расчетов Serpent [16] для конфигураций БФС-97-1 (а также 2-4), количественно сопоставить температурный и межбиблиотечный эффекты с суммарной технологической неопределенностью эталонного эксперимента и с результатами независимого расчета по программе TRIGEX, а также физически интерпретировать межбиблиотечные отличия  $k_{\text{eff}}$  на основе однопараметрической нуклидной декомпозиции. Расчеты ограничены серией БФС-97; конфигурации 99/101 рассматриваются только как контекст бенчмарка.

### Методика расчетного моделирования и кросс-верификации

Общая логика анализа показана на рисунке 1. Сначала фиксируется интервал технологической неопределенности эталонного эксперимента как внешняя шкала воспроизведения. Затем температурный эффект, рассчитанный кодом Serpent на одной библиотеке, сопоставляется с результатами расчета по коду TRIGEX. Далее сравниваются абсолютные  $k_{\text{eff}}$  по трем библиотекам, после чего нуклидная декомпозиция объясняет выход за технологическое окно.

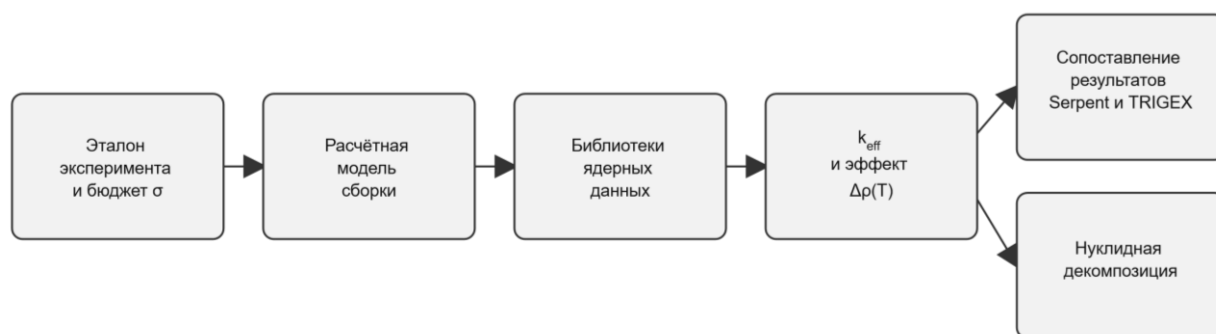


**Рисунок 1.** Схема кросс-верификации и анализа неопределенностей: от эталонной неопределенности  $\sigma(k_{\text{eff}})$  через расчетную модель и библиотеки ядерных данных к сопоставлению эффектов реактивности, рассчитанных кодами Serpent и TRIGEX, и к нуклидной декомпозиции. Критерий воспроизведения:  $|k_{\text{расч}} - k_{\text{эт}}|$  сравнивается с технологической  $\sigma$ ;  $|\Delta\rho_{\text{Serpent}} - \Delta\rho_{\text{TRIGEX}}|$  – с  $2-3\sigma(\Delta\rho)$

**Figure 1.** Cross-verification and uncertainty analysis flowchart: from the reference uncertainty  $\sigma(k_{\text{eff}})$  through the computational model and nuclear data libraries to comparison of the reactivity effects calculated with Serpent and TRIGEX and to nuclide decomposition. Reproducibility criterion:  $|k_{\text{calc}} - k_{\text{bench}}|$  is compared with technological  $\sigma$ ;  $|\Delta\rho_{\text{Serpent}} - \Delta\rho_{\text{TRIGEX}}|$  with  $2-3\sigma(\Delta\rho)$

**Объект моделирования.** Объектом исследования выбраны четыре критические конфигурации серии БФС-97 стенда БФС-1 (ФЭИ, эксперименты 2004-2005 гг.), включенные в международный справочник критических экспериментов [4]. Активная зона набирается из алюминиевых трубок внешним диаметром 5,0 см (толщина стенки 0,1 см) в гексагональной решетке с шагом  $5,10 \pm 0,01$  см. В трубки загружаются блочки металлического плутония Pu(95)L, обедненного UO<sub>2</sub>, стали и алюминия; в конфигурациях 97-2 и 97-4 между трубками устанавливаются полиэтиленовые стержни диаметром 0,8 см, а в 97-3 и 97-4 дополнительно вводятся полиэтиленовые таблетки над блочками плутония. Таким образом формируется ряд

по атомному отношению водорода к плутонию H/Pu: 0 (97-1), 1,0 (97-2), 4,7 (97-3), 6,0 (97-4) – от быстрого спектра (более 50 % делений выше 100 кэВ) к смешанному.

Конфигурации 97-1 и 97-3 соответствуют наборам без межтрубных полиэтиленовых стержней, но различаются наличием полиэтиленовых таблеток в трубке; 97-2 и 97-4 добавляют стержни. Такое построение ряда позволяет проследить переход от быстрого к смешанному спектру при сохранении плутониевой загрузки (~22 % Pu в топливе, 4,6 % <sup>240</sup>Pu в плутонии). Эталонные значения  $k_{\text{eff}}$  расчетной модели эксперимента и полные неопределенности ( $1\sigma$ ) по [4] приведены в таблице 1.

**Таблица 1.** Эталонные характеристики БФС-97 по оценке критических экспериментов [4]  
**Table 1.** Reference characteristics of BFS-97 according to the critical benchmark evaluation [4]

| Сборка   | Эталонный $k_{\text{eff}}$ | $\sigma_{\text{total}}$ , % | $\delta k/\delta t$ , 1/°C | Вклад T ( $\pm 15$ °C), % |
|----------|----------------------------|-----------------------------|----------------------------|---------------------------|
| БФС-97/1 | $1,0010 \pm 0,0029$        | 0,29                        | $-4,6 \cdot 10^{-6}$       | 0,01                      |
| БФС-97/2 | $1,0011 \pm 0,0026$        | 0,26                        | $-2,2 \cdot 10^{-5}$       | 0,03                      |
| БФС-97/3 | $1,0016 \pm 0,0031$        | 0,31                        | $-3,7 \cdot 10^{-5}$       | 0,06                      |
| БФС-97/4 | $1,0011 \pm 0,0027$        | 0,27                        | $-3,9 \cdot 10^{-5}$       | 0,06                      |

**Расчетный код, библиотеки и исходные данные.** Нейтронно-физические расчеты выполнены непрерывно-энергетическим кодом Монте-Карло Serpent 2 версии 2.1.31 [16]. Температурная подготовка сечений свободных атомов выполнялась посредством предварительного доплеровского уширения встроенным препроцессором Serpent. Термализация нейтронов в полиэтилене учитывалась с использованием данных теплового рассеяния  $S(\alpha, \beta)$ . Использованы библиотеки оцененных нейтронных данных JEFF-3.1.1, JEFF-3.3 и ENDF/B-VII.1. Геометрия и составы воспроизводят эталонную расчетную модель эксперимента с гетерогенной структурой трубок и блочков. Для высокостатистических прогонов типовые параметры:  $10^6$  нейтронов на цикл, порядка  $10^4$  циклов; достигаемая статистическая погрешность  $k_{\text{eff}}$  – около  $1 \cdot 10^{-5}$ . Для межбиблиотечного сравнения на конфигурации 97-4 дополнительно использованы более короткие прогоны ( $\sigma \approx 3 \cdot 10^{-4}$ ).

Рассчитываемые функционалы: эффективный коэффициент размножения  $k_{\text{eff}}$ ; тем-

пературный эффект реактивности при заданном  $\Delta T$ ; коэффициент реактивности по температуре  $\alpha_T \approx \Delta k/\Delta T$ ; межбиблиотечный константный эффект  $\Delta k_{\text{библ}} = k_{\text{библ}} - k_{\text{база}}$ ; вклады отдельных нуклидов  $\Delta k_i$  при однопараметрической замене сечений.

Обработка результатов нуклидной декомпозиции выполнялась следующим образом. Для каждой замены нуклида фиксировались  $k_{\text{eff}}$  и его статистическая погрешность; эффект  $\Delta k_i$  считался значимым, если  $|\Delta k_i|$  существенно превышал комбинированную статистическую неопределенность пары расчетов «базовая библиотека» и «базовая библиотека + замена нуклида». Затем нуклиды ранжировались по  $|\Delta k_i|$ , и доминирующие вкладчики сопоставлялись с известными изменениями оценок сечений между релизами библиотек и с качественными выводами работ по анализу чувствительности и неопределенностей для <sup>239</sup>Pu и <sup>238</sup>U. Такой порядок позволяет перейти от «таблицы отличий» к физической интерпретации, не претендуя на замену полного ковариационного анализа.

**Метод определения воспроизводимости экспериментальных результатов.** В оценке критического эксперимента [4] неопределенность температуры активной зоны принята равной  $\pm 15$  °C ( $1\sigma$ ); величина 15 °C представляет собой амплитуду (полуширину) симметричного интервала температурной неопределенности. Температурный отклик Serpent определялся для направленного повышения температуры от 314 до 329 K ( $\Delta T = +15$  K; ENDF/B-VII.1). Для БФС-97-1 дополнительно рассчитана сетка 302 / 317 / 332 K на JEFF-3.1.1 и JEFF-3.3.

Температурный эффект определялся как разность реактивностей (1):

$$\Delta\rho = \frac{1}{k(T_1)} - \frac{1}{k(T_2)}. \quad (1)$$

Абсолютная статистическая погрешность эффекта оценивалась как (2):

$$\sigma(\Delta\rho) \approx \sqrt{\left(\frac{\sigma_1}{k_1}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_2}{k_2}\right)^2}. \quad (2)$$

Результаты Serpent сопоставлялись с оценками эффекта по детерминистическому коду TRIGEX (групповые константы БНАБ-93), используемыми в оценке эксперимента для коэффициентов Доплера [4]. В оценке [4] результаты TRIGEX представлены отрицательной  $\delta k/\delta T$  и соответствующим симметричным вкладом  $\pm \delta k$  в неопределенность для интервала  $\pm 15$  °C. Для сопоставления с результатами Serpent температурная производная TRIGEX пересчитана для направленного изменения температуры  $\Delta T = +15$  K; поэтому оценка температурного эффекта имеет отрицательный знак. Для состояний, близких к критическим, при сопоставлении принято  $\Delta\rho \approx \Delta k$ .

Критерий воспроизведения эксперимента (порядок определения согласованности результатов) имеет двухуровневый подход (1). Для абсолютного  $k_{\text{eff}}$ :  $|k_{\text{расч}} - k_{\text{эт}}|$  сравнивается с полной технологической неопределенностью эксперимента (0,26-0,31 %), а не со статистической погрешностью Монте-Карло (2). Для температурного эффекта:  $|\Delta\rho (\text{Serpent}) - \Delta\rho (\text{TRIGEX})|$  сравнивается с  $2-3\sigma(\Delta\rho)$ . Такое разделение необходимо, поскольку статистическая погрешность

Монте-Карло (порядка 1-4 pcm для расчетов таблицы 2) на порядок меньше полной технологической неопределенности и не может служить единственной мерой «согласия с экспериментом».

**Нуклидная декомпозиция.** Константный (межбиблиотечный) эффект оценивался прямым пересчетом одной и той же геометрии на JEFF-3.1.1, JEFF-3.3 и ENDF/B-VII.1. За базу при вычислении  $\Delta k_{\text{библ}}$  приняты результаты ENDF/B-VII.1.

Для физической интерпретации отличий применена однопараметрическая нуклидная декомпозиция: при фиксированной базовой библиотеке сечения выбранного нуклида заменялись на сечения из альтернативной библиотеки, после чего вычислялось  $\Delta k_i = k(\text{база} + \text{нуклид}^*) - k(\text{база})$ . Рассматривались нуклиды  $^{241}\text{Am}$ ,  $^{16}\text{O}$ ,  $^{239}\text{Pu}$ ,  $^{240}\text{Pu}$ ,  $^{241}\text{Pu}$ ,  $^{235}\text{U}$ ,  $^{238}\text{U}$ . Для конфигурации 97-1 базой служила JEFF-3.3, для 97-4 - JEFF-3.1.1. Метод не эквивалентен полному анализу чувствительности с ковариациями: он выявляет нуклиды, ответственные за сдвиг  $k_{\text{eff}}$  между конкретными оценками, но не дает  $\sigma(k_{\text{eff}})$  по ковариационной матрице. Тем не менее он прямо связывает наблюдаемый межбиблиотечный разброс с физикой сечений актинидов.

## Результаты и обсуждение

**Интервал технологической неопределенности как шкала воспроизведения.** Согласно [4], для БФС-97 суммарная неопределенность  $k_{\text{eff}}$  формируется из вкладов избытка реактивности ( $< 0,01$  %), температуры (0,01-0,06 %), материального состава (0,12-0,14 %) и геометрии (0,23-0,27 %). Геометрический вклад включает неопределенность высоты зоны (порядка 0,9 % по высоте  $\rightarrow \delta k \approx 0,18-0,23$  %) и повторяемость эксперимента ( $\pm 0,15$  %  $\delta k$ ). Вклад материального состава определяется массой и изотопным составом плутония, массой полиэтиленовых таблеток и составом  $\text{UO}_2$  отражателя, с учетом пространственных корреляций (факторы корреляции  $C = 1,3$  для зоны и  $C = 3$  для отражателя).

Практический вывод для валидации: расчет, попадающий в интервал  $k_{\text{эт}} \pm \sigma_{\text{эт}}$  (примерно  $\pm 0,3$  %  $\delta k$ ), может считаться согласованным с экспериментом в смысле полной

технологической неопределенности. Отклонение в несколько десятков pcm, будучи статистически значимым относительно погрешности Монте-Карло, еще не означает невоспроизведения эталона. Напротив, систематический сдвиг на 0,5-1 % уже выходит за технологическое окно и должен интерпретироваться как константный (или методический) эффект.

**Температурный эффект: кросс-верификация Serpent и TRIGEX.** Результаты расчета  $k_{\text{eff}}$  при 314 К и 329 К (ENDF/B-VII.1) и соответствующие эффекты реактивности приведены в таблице 2. Использованы значения коэффициента размножения из выходных файлов Serpent; для конфигурации 97-2 принято  $k_{\text{eff}}(329 \text{ К}) = 1,0003$  (статистическая погрешность  $2\sigma = 5 \cdot 10^{-6}$ ).

**Таблица 2.** Температурный эффект  $\Delta\rho = \rho(329 \text{ К}) - \rho(314 \text{ К})$ : Serpent (ENDF/B-VII.1) и TRIGEX  
**Table 2.** Temperature effect  $\Delta\rho = \rho(329 \text{ К}) - \rho(314 \text{ К})$ : Serpent (ENDF/B-VII.1) and TRIGEX

| Модель | $k_{\text{eff}}(314 \text{ К})$ | $k_{\text{eff}}(329 \text{ К})$ | $\Delta\rho$ (Serpent) | $\sigma(\Delta\rho)$ | $\Delta\rho$ (TRIGEX) |
|--------|---------------------------------|---------------------------------|------------------------|----------------------|-----------------------|
| 97-1   | 0,9960                          | 0,9958                          | -0,000179              | $1,4 \cdot 10^{-5}$  | -0,0001               |
| 97-2   | 1,0008                          | 1,0003                          | -0,000480              | $4,1 \cdot 10^{-5}$  | -0,0003               |
| 97-3   | 1,0039                          | 1,0033                          | -0,000625              | $1,4 \cdot 10^{-5}$  | -0,0006               |
| 97-4   | 1,0018                          | 1,0011                          | -0,000638              | $1,4 \cdot 10^{-5}$  | -0,0006               |

С ростом мягкости спектра модуль температурного эффекта увеличивается: от ~18 pcm на 97-1 до ~63-64 pcm на 97-3/97-4. Физически это связано с усилением роли термализации и доплер-уширения резонансов  $^{238}\text{U}$  (и, в меньшей степени,  $^{239}\text{Pu}$ ) при добавлении водорода в виде полиэтилена. На жестком спектре 97-1 доля тепловых нейтронов мала, поэтому вариация температуры на 15 °С дает слабый отклик  $k_{\text{eff}}$ ; на смешанном спектре 97-4 отклик возрастает примерно втрое, что согласуется с ростом  $|\delta k/\delta t|$  в таблице 1.

Сопоставление с TRIGEX показывает совпадение знака и тенденции вдоль ряда 97-1...97-4. Для 97-3 и 97-4 значения  $\Delta\rho(\text{Serpent})$  составляют около -0,00063 при  $\Delta\rho(\text{TRIGEX}) = -0,0006$ ; расхождения равны соответственно примерно  $1,8\sigma(\Delta\rho)$  и  $2,7\sigma(\Delta\rho)$ . Для 97-1 и 97-2 совпадают знак и порядок величины эффекта, однако расхождение превышает  $3\sigma(\Delta\rho)$ . Таким образом, температурный эффект служит кросс-верификационным тестом модели, но сте-

пень количественного согласия зависит от конфигурации.

Сравнение вкладов температуры в  $\sigma(k_{\text{eff}})$  по таблице 1 и рассчитанных эффектов (табл. 2) показывает внутреннюю согласованность шкалы: там, где  $|\delta k/\delta t|$  больше (97-3/97-4), и вклад  $\pm 15$  °С в суммарную неопределенность выше, и  $|\Delta\rho|$  больше. Это означает, что принятая в эталоне температурная неопределенность не является формальной «добавкой», а отражает реальную чувствительность системы. Для валидации коэффициентов реактивности именно такие конфигурации наиболее информативны.

Для БФС-97-1 выполнен дополнительный расчет на JEFF-3.1.1 и JEFF-3.3 при температурах 302, 317 и 332 К (табл. 3). Абсолютные  $k_{\text{eff}}$  различаются между библиотеками примерно на 420-430 pcm, однако температурные приращения  $\Delta k$  относительно 317 К почти совпадают. Таким образом, температурный эффект как дифференциальная характеристика существенно менее чувствителен к выбору библиотеки, чем абсолютная критичность.

**Таблица 3.** Температурные вариации для БФС-97-1 (Serpent;  $\sigma \approx 4,9 \cdot 10^{-6}$ )  
**Table 3.** Temperature variations for BFS-97-1 (Serpent;  $\sigma \approx 4,9 \cdot 10^{-6}$ )

| Библиотека | $k_{\text{eff}}(317 \text{ К})$ | $\Delta k (-15 \text{ °С})$ | $\Delta k (+15 \text{ °С})$ | $\alpha_T^- / \alpha_T^+, 1/\text{°С}$     |
|------------|---------------------------------|-----------------------------|-----------------------------|--------------------------------------------|
| JEFF-3.1.1 | 0,9947                          | $+2,11 \cdot 10^{-4}$       | $-1,74 \cdot 10^{-4}$       | $1,41 \cdot 10^{-5} / -1,16 \cdot 10^{-5}$ |
| JEFF-3.3   | 0,9990                          | $+2,04 \cdot 10^{-4}$       | $-1,74 \cdot 10^{-4}$       | $1,36 \cdot 10^{-5} / -1,16 \cdot 10^{-5}$ |

**Сравнительный анализ размножающих свойств модели при использовании различных библиотек.** Наиболее показателен межбиблиотечный разброс для конфигурации 97-4 (смешанный спектр, атомное отношение  $H/Pu = 6$ ). Результаты: JEFF-3.1.1 –  $k_{eff} = 0,9990 \pm 3,2 \cdot 10^{-4}$ ; ENDF/B-VII.1 –  $1,0018 \pm 9,8 \cdot 10^{-6}$ ; JEFF-3.3 –  $1,0108 \pm 3,4 \cdot 10^{-4}$ . Относительно ENDF/B-VII.1 константный эффект составляет примерно -0,28 % для JEFF-3.1.1 и +0,90 % для JEFF-3.3 (диапазон 0,2-0,9 %).

Сопоставление с эталонным  $k_{eff}$  эксперимента ( $1,0011 \pm 0,0027$ ) показывает, что результат ENDF/B-VII.1 лежит внутри технологического окна; JEFF-3.1.1 смещен вниз примерно на 0,2 %, что еще сопоставимо с полной неопределенностью эксперимента; JEFF-3.3 завышает  $k_{eff}$  примерно на 1 %, то есть выходит за пределы технологической неопределенности. Независимые расчеты непрерывным методом Монте-Карло (ENDF/B-VI.6) в [4] для 97-4 дают  $k_{eff} \approx 1,0001$ , а многогрупповой расчет с константами БНАБ-93 –  $\approx 0,9982$ . Serpent с ENDF/B-VII.1 попадает в ту же область, что и непрерывный Монте-Карло справочника, тогда как JEFF-3.3 образует выброс вверх – аргумент в пользу константной, а не геометрической природы расхождения.

Физическая причина усиления межбиблиотечного эффекта при переходе от 97-1 к 97-4 – рост доли нейтронов в резонансной и тепловой областях, где различия оценок сечений актинидов между JEFF-3.1.1, JEFF-3.3 и ENDF/B-VII.1 наиболее значимы для баланса размножения.

**Нуклидная декомпозиция расхождений результатов при использовании различных библиотек.** Результаты однопараметрической замены сечений нуклидов приведены в таблицах 4 и 5.

Для БФС-97-1 (базовая библиотека JEFF-3.3,  $k_{eff} = 1,000100$ ) наибольшие по модулю вклады дают  $^{238}U$  ( $\Delta k \approx -3,90 \cdot 10^{-3}$ ) и  $^{239}Pu$  ( $\Delta k \approx -1,01 \cdot 10^{-3}$ ). Вклады  $^{16}O$ ,  $^{240}Pu$  и  $^{235}U$  на порядок меньше;  $^{241}Am$  и  $^{241}Pu$  практически не влияют в пределах рассмотренной замены.

Для БФС-97-4 (базовая библиотека JEFF-3.1.1,  $k_{eff} = 0,998995$ ) вклад  $^{239}Pu$  возрастает до  $\Delta k \approx +8,18 \cdot 10^{-3}$  (~0,82 %), вклад  $^{238}U$  составляет  $+3,30 \cdot 10^{-3}$  (~0,33 %). Знаки зависят от направления замены относительно базовой библиотеки, но состав доминирующих нуклидов устойчив: именно  $^{239}Pu$  и  $^{238}U$  определяют межбиблиотечный сдвиг.

**Таблица 4.** Нуклидная декомпозиция для БФС-97-1 (база JEFF-3.3)

**Table 4.** Nuclide decomposition for BFS-97-1 (JEFF-3.3 baseline)

| Нуклид          | $k_{eff}$ | $\Delta k$            | $\Delta k, \%$ |
|-----------------|-----------|-----------------------|----------------|
| База (JEFF-3.3) | 1,0001    | -                     | -              |
| $^{241}Am$      | 1,0001    | $+3,0 \cdot 10^{-5}$  | +0,003         |
| $^{16}O$        | 0,9999    | $-2,1 \cdot 10^{-4}$  | -0,021         |
| $^{239}Pu$      | 0,9991    | $-1,01 \cdot 10^{-3}$ | -0,101         |
| $^{240}Pu$      | 1,0005    | $+3,5 \cdot 10^{-4}$  | +0,035         |
| $^{241}Pu$      | 1,0001    | $+3,0 \cdot 10^{-5}$  | +0,003         |
| $^{235}U$       | 1,0003    | $+1,7 \cdot 10^{-4}$  | +0,017         |
| $^{238}U$       | 0,9962    | $-3,90 \cdot 10^{-3}$ | -0,390         |

**Таблица 5.** Нуклидная декомпозиция для БФС-97-4 (база JEFF-3.1.1)

**Table 5.** Nuclide decomposition for BFS-97-4 (JEFF-3.1.1 baseline)

| Нуклид            | $k_{eff}$ | $\Delta k$            | $\Delta k, \%$ |
|-------------------|-----------|-----------------------|----------------|
| База (JEFF-3.1.1) | 0,9990    | -                     | -              |
| $^{241}Am$        | 0,9986    | $-3,6 \cdot 10^{-4}$  | -0,036         |
| $^{16}O$          | 0,9992    | $+2,1 \cdot 10^{-4}$  | +0,021         |
| $^{239}Pu$        | 1,0072    | $+8,18 \cdot 10^{-3}$ | +0,818         |
| $^{240}Pu$        | 0,9989    | $-8,3 \cdot 10^{-5}$  | -0,008         |
| $^{241}Pu$        | 0,9990    | $+2,0 \cdot 10^{-5}$  | +0,002         |
| $^{235}U$         | 0,9991    | $+1,3 \cdot 10^{-4}$  | +0,013         |
| $^{238}U$         | 1,0023    | $+3,30 \cdot 10^{-3}$ | +0,330         |

Физическая интерпретация опирается на изменения оценок между JEFF-3.1.1 и JEFF-3.3 [10]. Для  $^{239}\text{Pu}$  в JEFF-3.3 обновлены резонансная область и согласование средних сечений деления и захвата в неразрешенной области (4-30 кэВ) с новой оценкой в быстрой области. Рост вклада  $^{239}\text{Pu}$  от 97-1 к 97-4 отражает увеличение чувствительности  $k_{\text{eff}}$  к деталям сечения деления/захвата  $^{239}\text{Pu}$  при смягчении спектра.

Доминирование  $^{238}\text{U}$  объясняется большим объемом обедненного  $\text{UO}_2$  в зоне и отражателе: даже небольшие относительные изменения сечений радиационного захвата и неупругого рассеяния  $^{238}\text{U}$  дают заметный интегральный эффект. В системах с плутоний-урановыми композициями вклад  $^{238}\text{U}$  ( $n,\gamma$ ) и ( $n,n'$ ) в константную неопределенность  $k_{\text{eff}}$  регулярно отмечается в анализах чувствительности и неопределенностей [9]; полученные однопараметрические  $\Delta k_i$  согласуются с этим выводом, хотя и не заменяют полный ковариационный расчет.

С точки зрения нейтронной физики ряд 97-1...97-4 – контролируемое изменение спектральной жесткости при почти неизменной доле плутония. Если межбиблиотечный сдвиг и вклад  $^{239}\text{Pu}$  растут вместе с  $\text{H/Pu}$ , источником расхождений являются области сечений, «включаемые» при термализации, а не грубая ошибка геометрии. Полученные результаты подтверждают такую интерпретацию.

Ограничения декомпозиции: однопараметрическая замена не учитывает корреляции ковариационных файлов; сумма  $\Delta k_i$  не обязана в точности равняться полному  $\Delta k_{\text{lib}}$ ; для 97-4 точки JEFF получены с  $\sigma \approx 3 \cdot 10^{-4}$ , поэтому детализация на уровне единиц  $\text{pcm}$  неуместна. Тем не менее порядок величин и ранжирование нуклидов устойчивы.

Важно, что один нуклид способен изменить  $k_{\text{eff}}$  на величину, сравнимую с суммарной технологической неопределенностью эталонного эксперимента ( $\sim 0,3\%$ ) или превышающую его (вклад  $^{239}\text{Pu}$  на 97-4  $\sim 0,8\%$ ). Это объясняет, почему абсолютная критичность сильнее зависит от библиотеки, чем температурный эффект: дифференциал по температуре зондирует отклик уже зафиксиро-

ванной оценки сечений, тогда как замена библиотеки меняет саму оценку.

## Заключение

Выполнена кросс-верификация расчетного моделирования критических конфигураций БФС-97-1...97-4 кодом Serpent с библиотеками JEFF-3.1.1, JEFF-3.3 и ENDF/B-VII.1. Актуализированы диапазоны технологических неопределенностей по оценке критических экспериментов БФС-97: полная неопределенность  $k_{\text{eff}}$  для серии составляет 0,26-0,31 % при доминировании геометрического вклада. Стоит отметить, что ограничения в выводах о воспроизводимости эксперимента в настоящем исследовании связаны с тем, что:

1) температурная неопределенность  $\pm 15^\circ\text{C}$  для БФС-97 дает вклад в  $\sigma(k_{\text{eff}})$  0,01-0,06 % и эффект реактивности  $(1,8-6,4) \cdot 10^{-4}$ ; Serpent и TRIGEX дают одинаковые знак и тенденцию эффекта; количественное согласие зависит от конфигурации, а для БФС-97-1 эффект слабо зависит от выбора между JEFF-3.1.1 и JEFF-3.3.

2) абсолютный  $k_{\text{eff}}$  чувствителен к константному обеспечению. Разброс 0,2-0,9 % для 97-4 сопоставим с технологической неопределенностью 0,27 %. Нуклидная декомпозиция указывает на  $^{238}\text{U}$  и  $^{239}\text{Pu}$  как на физические носители эффекта.

3) критерий воспроизведения должен формулироваться относительно полного перечня неопределенностей эталонного эксперимента, а не относительно статистической погрешности Монте-Карло. При использовании БФС-97 для обоснования методик следует явно указывать: (а) какой функционал валидируется – абсолютный  $k_{\text{eff}}$  или эффект реактивности; (б) какой уровень технологической неопределенности принят; (в) какая библиотека использована и каков ее вклад в систематическое смещение.

Температурный эффект реактивности при изменении температуры с 314 до 329 К возрастает по модулю от  $\sim 18\text{ pcm}$  (97-1) до  $\sim 63-64\text{ pcm}$  (97-3/97-4) по мере смягчения спектра. Для БФС-97-3 и БФС-97-4 результаты согласуются с оценками TRIGEX в пределах  $2-3\sigma(\Delta\rho)$ ; для БФС-97-1 и БФС-97-2

совпадают знак и порядок величины эффекта, однако расхождение превышает  $3\sigma(\Delta\rho)$ . Для БФС-97-1 дифференциальный температурный отклик почти не зависит от выбора между JEFF-3.1.1 и JEFF-3.3 при заметном сдвиге абсолютного  $k_{\text{eff}}$ .

Межбиблиотечный разброс абсолютного  $k_{\text{eff}}$  на конфигурации 97-4 достигает 0,2–0,9 % и сопоставим с технологической неопределенностью эксперимента. Однопараметрическая нуклидная декомпозиция выявила доминирующий вклад сечений  $^{238}\text{U}$  и  $^{239}\text{Pu}$ ; для более мягкой конфигурации 97-4 вклад  $^{239}\text{Pu}$  возрастает до ~0,8 %, что согласуется с обновлениями оценок актинидов в JEFF-3.3 и с результатами анализа чувствительности плутониевых систем.

Полученные результаты показывают, что при расчетах кодом Serpent константная составляющая определяется прежде всего выбранной библиотекой оцененных ядерных данных и спектром системы, а не методом

Монте-Карло как таковым. Для плутоний-урановых систем со смешанным спектром межбиблиотечный сдвиг  $k_{\text{eff}}$  может быть сопоставим с технологической неопределенностью бенчмарка или превышать ее. Поэтому библиотеку следует рассматривать как неотъемлемую часть валидируемой связки «код–библиотека–модель», а абсолютную критичность и дифференциальные эффекты — валидировать отдельно. Наблюдаемый разброс между JEFF-3.1.1, JEFF-3.3 и ENDF/B-VII.1 характеризует чувствительность результата к выбору этих библиотек, но не является полной ковариационной оценкой константной неопределенности  $\sigma_{\text{const}}(k_{\text{eff}})$ ; для ее определения необходимы коэффициенты чувствительности и распространение ковариаций ядерных данных. Выявленные вклады  $^{239}\text{Pu}$  и  $^{238}\text{U}$  указывают приоритетные направления дальнейшей верификации ядерных данных для систем с усиленной термализацией.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Dean V.F., Blackwood L.G. ICSBEP Guide to the Expression of Uncertainties for Critical Experiments. Revision 5. Paris: OECD Nuclear Energy Agency, 2008. Available at: [https://www.oecd-neia.org/upload/docs/application/pdf/2020-03/icsbep\\_guide\\_to\\_the\\_expression\\_of\\_uncertainties.pdf](https://www.oecd-neia.org/upload/docs/application/pdf/2020-03/icsbep_guide_to_the_expression_of_uncertainties.pdf) (accessed: 20.06.2026).
2. OECD Nuclear Energy Agency. IRPhEP Guide to the Expression of Uncertainty. NEA/NSC/DOC(2017). Paris: OECD Nuclear Energy Agency, 2017. Available at: [https://www.oecd-neia.org/upload/docs/application/pdf/2021-07/uncguide\\_irpheap.pdf](https://www.oecd-neia.org/upload/docs/application/pdf/2021-07/uncguide_irpheap.pdf) (accessed: 20.06.2026).
3. Bess J.D., Ivanova T. Current overview of ICSBEP and IRPhEP benchmark evaluation practices. *EPJ Web Conferences*. 2020;239:18002. <https://doi.org/10.1051/epjconf/202023918002>
4. Kochetkov A., Semenov M., Rozhikhin E. BFS-97, -99, -101 Assemblies: Critical Experiments with Heterogeneous Compositions of Plutonium, Depleted-Uranium Dioxide, and Polyethylene. MIX-MISC-MIXED-001. In: International Handbook of Evaluated Criticality Safety Benchmark Experiments. NEA/NSC/DOC(95)03. Paris: OECD Nuclear Energy Agency, 2006. Available at: <https://www.oecd-neia.org/science/wpncs/icsbep/evaluations/russia.html> (accessed: 20.06.2026).
5. Dulin V.V., Matveenko I.P., Rozhikhin E., Semenov Yu.M., Tsibulya A.M. An overview of the experiments performed at the BFS facilities and evaluated for the International Reactor Physics Experiment Evaluation Project. *Nuclear science and engineering*. 2014;178(3):377-386. <https://doi.org/10.13182/NSE14-58>
6. Campolina D., Frybort J. Uncertainty propagation for LWR burnup benchmark using sampling based code SCALE/SAMPLER. *Acta Polytechnica CTU Proceedings*. 2018;14:8-13. <https://doi.org/10.14311/APP.2018.14.0008>
7. Rearden B.T., Jessee M.A., editors. SCALE Code System. ORNL/TM-2005/39, Version 6.2.3. Oak Ridge (TN): Oak Ridge National Laboratory; 2018. Available at: <https://www.ornl.gov/scale/scale-manual> (accessed: 20.06.2026).
8. Rochman D., Koning A.J., van der Marck S.C. Nuclear data uncertainty propagation: Perturbation vs. Monte Carlo. *Annals of nuclear energy*. 2011;38(5):942-952. <https://doi.org/10.1016/j.anucene.2011.01.026>
9. Cabellos O., et al. Checking, processing and verification of nuclear data covariances. *EPJ N – Nuclear Sciences & Technologies*. 2018;4:39. <https://doi.org/10.1051/epjn/2018028>
10. Plompen A.J.M., Cabellos O., De Saint Jean C., et al. The joint evaluated fission and fusion nuclear data library, JEFF-3.3. *Eur Phys J A*. 2020;56:181. <https://doi.org/10.1140/epja/s10050-020-00141-9>
11. Chadwick M.B., Herman M., Obložinský P., et al. ENDF/B-VII.1 nuclear data for science and technology: cross sections, covariances, fission product yields and decay data. *Nuclear data sheets*. 2011;112(12):2887-2996. <https://doi.org/10.1016/j.nds.2011.11.002>
12. Chadwick M.B., Obložinský P., Herman M., et al. ENDF/B-VII.0: next generation evaluated nuclear data library for nuclear science and technology. *Nuclear data sheets*. 2006;107(12):2931-3060. <https://doi.org/10.1016/j.nds.2006.11.001>

13. Андрианова О.Н., Головки Ю.Е., Жердев Г.М., Ломаков Г.Б., Теплухина Е.С. Анализ бенчмарк-экспериментов с быстрым спектром нейтронов и моделей РБН с использованием различных библиотек оцененных нейтронных данных. *Известия вузов. Ядерная энергетика*. 2021;(1):71-82. <https://doi.org/10.26583/npe.2021.1.07>

Andrianova O.N., Golovko Yu.E., Zherdev G.M., Lomakov G.B., Teplukhina E.S. 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. *Izvestiya vuzov. Yadernaya energetika*. 2021;1:71-82. (in Russ.). <https://doi.org/10.26583/npe.2021.1.07>

14. 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):109-124. <https://doi.org/10.26583/npe.2024.3.09>

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;(3):109-124. (in Russ.). <https://doi.org/10.26583/npe.2024.3.09>

15. Андрианова О.Н., Дулин В.А., Михайлова И.В., Андрианов А.А. Расчетно-экспериментальный анализ скоростей реакций Pu, Np, Am, Cm на критических сборках БФС. *Атомная энергия*. 2017;122(5):243-248. <https://doi.org/10.1007/s10512-017-0269-1>

Andrianova O.N., Dulin V.A., Mikhailova I.V., Andrianov A.A. Computational and experimental analysis of Pu, Np, Am, Cm reaction rates on BFS critical benches. *Atomic energy*. 2017;122:291-298. <https://doi.org/10.1007/s10512-017-0269-1>

16. Leppänen J., Pusa M., Viitanen T., Valtavirta V., Kaltiaisenaho T. The Serpent Monte Carlo code: status, development and applications in 2013. *Annals of nuclear energy*. 2015;82:142-150. <https://doi.org/10.1016/j.anucene.2014.08.024>

#### ВКЛАД АВТОРОВ:

**Буркеев М.З.** – разработка расчетных моделей, анализ результатов, подготовка текста статьи;

**Внуков Р.А.** – обзор литературы, проверка расчетных моделей, подготовка текста статьи;

**Колесов В.В.** – подготовка текста статьи.

#### AUTHORS' CONTRIBUTION:

**Burkeev M.Z.** – development of computational models, analysis of results, manuscript preparation;

**Vnukov R.A.** – literature review, verification of computational models, manuscript preparation;

**Kolesov V.V.** – manuscript preparation.

#### ИСТОЧНИКИ ФИНАНСИРОВАНИЯ:

Заявляем об отсутствии внешнего финансирования при выполнении исследования.

#### FUNDING:

There is no external funding.

#### КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ:

Конфликт интересов отсутствует.

#### CONFLICT OF INTEREST:

No conflict of interest.

#### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ:

**Марс Замирович Буркеев**, специалист, отделение ядерной физики и технологий, Обнинский институт атомной энергетики – филиал Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ», г. Обнинск, Калужская обл., Российская Федерация. <https://orcid.org/0000-0002-9540-3456>

e-mail: perevozdd@mail.ru

**Руслан Адхамович Внуков**, старший преподаватель отделения ядерной физики и технологий, Обнинский институт атомной энергетики – филиал Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ», г. Обнинск, Калужская обл., Российская Федерация. <https://orcid.org/0000-0002-2048-0828>

e-mail: vnukovra@oiate.ru

**Валерий Васильевич Колесов**, кандидат физико-математических наук, доцент отделения ядерной физики и технологий, Обнинский институт атомной энергетики – филиал Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ», г. Обнинск, Калужская обл., Российская Федерация. <https://orcid.org/0000-0001-8905-1995>

e-mail: valeri-kolesov@yandex.ru

#### INFORMATION ABOUT THE AUTHORS:

**Mars Z. Burkeev**, specialist, Department of Nuclear Physics and Technologies, Obninsk Institute for Nuclear Power Engineering the Branch of National Research Nuclear University «MEPhI», Obninsk, Kaluga region, Russian Federation. <https://orcid.org/0000-0002-9540-3456>

e-mail: perevozdd@mail.ru

**Ruslan A. Vnukov**, Senior Lecturer, Department of Nuclear Physics and Technologies, Obninsk Institute for Nuclear Power Engineering the Branch of National Research Nuclear University «MEPhI», Obninsk, Kaluga region, Russian Federation. <https://orcid.org/0000-0002-2048-0828>

e-mail: vnukovra@oiate.ru

**Valery V. Kolesov**, Cand. Sci. (Phys.-Math.), Associate Professor, Department of Nuclear Physics and Technologies, Obninsk Institute for Nuclear Power Engineering the Branch of National Research Nuclear University «MEPhI», Obninsk, Kaluga region, Russian Federation. <https://orcid.org/0000-0001-8905-1995>

e-mail: valeri-kolesov@yandex.ru

Поступила в редакцию / Received 27.07.2026

После доработки / Revision 03.09.2026

Принята к публикации / Accepted 07.09.2026