

## ФОРМИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ ГРУППОВЫХ КОНСТАНТ ДЛЯ НЕЙТРОННО-ФИЗИЧЕСКИХ РАСЧЕТОВ РЕАКТОРОВ НА БЫСТРЫХ НЕЙТРОНАХ НА ОСНОВЕ ФАЙЛОВ БИБЛИОТЕКИ РОСФОНД-2020.2

*Аверченкова Е.П.<sup>1</sup>, Дьяченко Я.В.<sup>1</sup>, Забродская С.В.<sup>1</sup>, Мантуров Г.Н.<sup>1</sup>, Мишин В.А.<sup>1</sup>, Панова Д.В.<sup>1</sup>, Перегудов А.А.<sup>1</sup>, Семенов М.Ю.<sup>1</sup>, Тормышев И.В.<sup>1</sup>, Ляпин Е.П.<sup>2</sup>*

<sup>1</sup>АО «ГНЦ РФ – ФЭИ»,

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

<sup>2</sup>Филиал АО «Концерн Росэнергоатом» Белоярская АЭС,

624251, Свердловская обл., г. Заречный



Переход БН-800 на полную загрузку смешанным оксидным уран-плутониевым топливом и планы по вовлечению в топливный цикл минорных актинидов привели к увеличению константной составляющей погрешности. С целью минимизации этой составляющей погрешности решено создать унифицированную систему групповых констант, с одинаковой точностью описывающей как урановую загрузку, так и загрузку смешанным оксидным уран-плутониевым топливом. Процесс формирования новой системы групповых констант включил в себя выбор исходных файлов нейтронных данных, обновление данных таблиц основных нейтронных сечений, факторов самоэкранировки и коэффициентов Допплера, а также данных о спектрах деления для основных топливных нуклидов. Проведена оценка методической составляющей погрешности для тестовых моделей активной зоны БН-800. С использованием системы групповых констант БНАБ-РФ22 удалось оценить поправку в 299-групповом расчете, которая составила 0,3%. Ранее при использовании библиотеки БНАБ-93 такой возможности не было ввиду отсутствия преемственности файлов оцененных нейтронных данных и используемых групповых констант.

Таким образом, создание унифицированной системы групповых констант позволит минимизировать константную составляющую погрешности и обеспечит более точное описание различных топливных конфигураций активных зон реакторов на быстрых нейтронах.

---

© *Аверченкова Е.П., Дьяченко Я.В., Забродская С.В., Мантуров Г.Н., Мишин В.А., Панова Д.В., Перегудов А.А., Семенов М.Ю., Тормышев И.В., Ляпин Е.П., 2024*

**Ключевые слова:** БН-800, РОСФОНД-2020.2, оцененные нейтронные данные, константная погрешность, групповые константы, смешанное оксидное уран-плутониевое топливо.

**Для цитирования:** Аверченкова Е.П., Дьяченко Я.В., Забродская С.В., Мантуров Г.Н., Мишин В.А., Панова Д.В., Перегудов А.А., Семенов М.Ю., Тормышев И.В., Ляпин Е.П. Формирование системы групповых констант для нейтронно-физических расчетов реакторов на быстрых нейтронах на основе файлов библиотеки РОСФОНД-2020.2. // Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2024. – № 2. – С. 155 – 169. DOI: <https://doi.org/10.26583/npe.2024.2.13>

### ВВЕДЕНИЕ

Для работ по проектированию и расчетному сопровождению ядерных энергетических установок необходима обязательная оценка погрешности проектных параметров. Один из способов минимизации этой погрешности – использование надежного и апробированного константного обеспечения.

Расчетные исследования нейтронно-физических характеристик реакторов на быстрых нейтронах базируются на использовании трехмерных диффузионных кодов JAR-FR [1], ГЕФЕСТ [2], ГЕФЕСТ800[3], TRIGEX [4], FACT-BR [5] и кодах, основанных на Sn-методе – TWODANT [6], КАТРИН [7], КАСКАД [8]. Эти коды нашли широкое применение в практике расчетов, потому что не требуют больших вычислительных затрат и занимают малое расчетное время.

Увеличенные за последнее десятилетие производительность и надежность вычислительной техники позволили проводить расчет реактора на основе сложных детальных моделей в программах, реализующих метод Монте-Карло. Наибольшее распространение получил американский программный комплекс MCNP5 [9], а также отечественные коды ММККЕНО [10] и MCU-FR [11].

Для проведения кроссверификации по всем перечисленным выше программам и для оценки методической составляющей погрешности расчета необходимо использовать единое константное обеспечение, которое на сегодняшний день осуществляется с помощью системы подготовки констант CONSYST [12] с библиотекой БНАБ-93 [13, 14]. С использованием данной системы констант для урановых реакторных систем удалось установить константную составляющую погрешности в величине критичности на уровне ~0,2%. Однако библиотека БНАБ-93 не имеет преемственности файлов оцененных нейтронных данных и используемых групповых констант, как следствие – невозможно оценить поправку в групповом расчете.

На данный момент состав активной зоны действующих быстрых реакторов начал меняться. Так осенью 2022 г. реактор БН-800 вышел в критику после десятой перегрузки с активной зоной, доля ТВС с уран-плутониевым топливом в которой составила 93%. Одинадцатую микрокампанию принято рассматривать как первый интервал работы БН-800 с полной загрузкой смешанным оксидным уран-плутониевым топливом. Нужно отметить, что это первый опыт промышленной эксплуатации активной зоны реактора с подобным видом топлива. Следующим этапом в рамках национальной стратегии по замыканию ядерного топливного цикла планируется добавление в топливный состав минорных актинидов. Как следствие, увеличатся доля плутония и масса минорных актинидов в составе активной зоны. Это означает, что установленный баланс константного обеспечения перейдет в область повышенной неопределенности. На рисунке 1 показано изменение значений  $k_{эф}$ ,

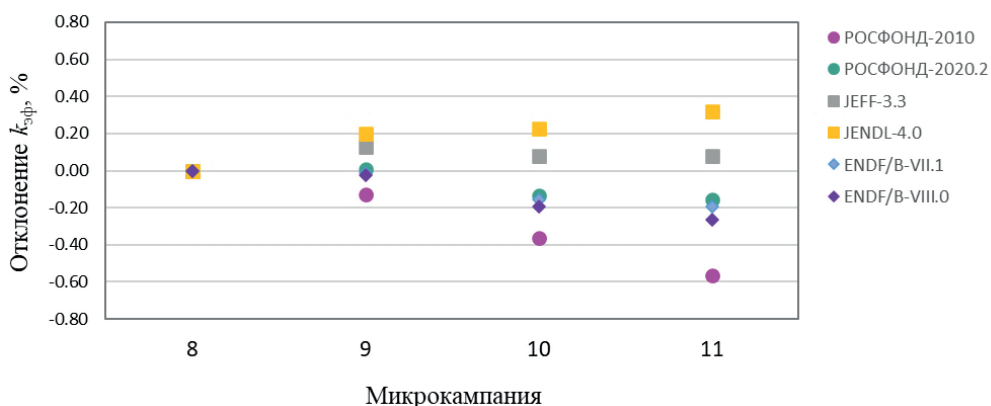


Рис. 1. Изменение значений  $k_{эф}$  по отношению к восьмой микрокампании

полученных при расчете БН-800 в период перехода на полную загрузку смешанным оксидным уран-плутониевым топливом (с восьмой по одиннадцатую микрокампанию).

С увеличением доли плутония в активной зоне увеличился разброс константной погрешности при использовании различных библиотек реакторных констант до  $\sim 1\%$  в оценке  $k_{эф}$ . В процессе вовлечения в топливный цикл минорных актинидов константная составляющая погрешности увеличится еще больше.

В связи с этим актуальной задачей становится создание новой версии групповой библиотеки констант, способной с одинаковой точностью описывать как урановые загрузки активной зоны, так и со смешанным уран-плутониевым топливом. Новую библиотеку констант целесообразно будет внедрить, как и существующую БНАБ-93, в проектные коды, используемые различными организациями для расчета быстрых реакторов.

## ВЫБОР ИСХОДНЫХ ДАННЫХ ДЛЯ ВЕРИФИКАЦИИ

Для формирования унифицированной верификации, с точки зрения расчета урановых и плутониевых систем, необходимо проанализировать имеющиеся современные библиотеки оцененных нейтронных данных. Для проведения верификационных расчетов были использованы следующие версии библиотек оцененных нейтронных данных: ENDF/B-VII.1 [15], ENDF/B-VIII.0 [16] – в США; JEFF-3.3.1 [17] – в Европе; JENDL-4.0 [18] – в Японии, а также российская библиотека групповых констант БНАБ-93 и файлы российских библиотек оцененных нейтронных данных РОСФОНД-2010 [19] и РОСФОНД-2020.2 [20].

В библиотеке данных РОСФОНД-2010 аккумулированы современные оценки нейтронных сечений для более 680-ти важных и второстепенных материалов (нуклидов). В ней содержатся полные наборы нейтронных данных для всех стабильных элементов периодической системы (как правило – для отдельных изотопов). Под полным набором понимается комплект данных, достаточный для учета взаимодействия нейтронов с ядрами при распространении нейтронов в среде.

В РОСФОНД-2020.2 оценки основных топливных и конструкционных материалов были обновлены и взяты из результатов работы проекта CIELO (The Collaborative International Evaluation Library Organization (CIELO) project) [21]. Уточнены данные по сечениям для расчета повреждающих доз конструкционных материалов, константы запаздывающих нейтронов, спектры нейтронов деления. Расширена база данных ковариационных матриц погрешностей ядерных констант.

Верификация вышеперечисленных библиотек констант была условно разделена на два этапа, включивших в себя верификацию на наборе бенчмарк-моделей из международного справочника ISCBEP Handbook [22] и тестовых моделей активной зоны БН-800.

На первом этапе верификации был проведен расчет бенчмарк-моделей. Модели подбирались с точки зрения соответствия реальным реакторным системам по составу и характеристикам энергетического спектра. Они были условно разбиты на две группы.

Для верификации констант основных делящихся нуклидов в быстром энергетическом спектре нейтронов использовались компактные металлические сборки (КМС) с высокообогащенным ураном (GODIVA, FLATTOP-25) и плутонием (JEZEBEL, FLATTOP-Pu). Конструкция сборок представляет собой либо металлическую сферу без отражателя, либо металлическую сферу, окруженную металлическим отражателем из обедненного урана. Также использовались цилиндрическая сборка с металлическим ураном (обогащение 10%) с отражателем из металлического обедненного урана (BIG TEN) и эксперимент, представляющий собой бесконечную ячейку с  $k_{\infty} = 1$ , в которой определялось критическое содержание  $^{235}\text{U}$  в смеси с  $^{238}\text{U}$  (ZEBRA 8B). Дополнительно использовалась искусственная модель, представляющая собой бесконечную среду, состоящую из  $^{235}\text{U}$  и  $^{238}\text{U}$  с  $k_{\infty} = 1$  (SCHERZO556).

Для верификации ядерных данных и методов подготовки констант использовались критические сборки с характеристиками, которые в большей степени соответствуют реальным быстрым реакторным системам (РС). Бенчмарк-модели подобраны таким образом, чтобы их состав коррелировал с моделями активных зон реакторов типа БН как с урановой загрузкой (сборки типа ZPR), так и с загрузкой оксидным уран-плутониевым топливом (сборки типа ZPPR). Таким образом, были отобраны сборки, удовлетворяющие условиям тестирования набора констант для проведения расчетов реакторов на быстрых нейтронах.

Второй этап верификации был проведен на тестовых моделях критических состояний БН-800. Для БН-800 были отобраны микрокомпании (с восьмой по одиннадцатую), характеризующие увеличение доли смешанного уран-плутониевого топлива в активной зоне до 100%.

Все тестовые модели разработаны в рамках расчетного комплекса BNcode [23] из архива топливных сборок реактора, в котором содержится информация по всем состояниям жизненного цикла реактора.

### РЕЗУЛЬТАТЫ ВЕРИФИКАЦИИ БИБЛИОТЕК НЕЙТРОННЫХ ДАННЫХ

Для верификации константного обеспечения проведена серия расчетов для бенчмарк-моделей на основе библиотек, описанных ранее. На рисунках 2, 3 показаны расхождения результатов расчета критичности для серии бенчмарк-моделей типа КМС и РС соответственно.

По представленным расчетным данным верификации константного обеспечения для серии бенчмарк-моделей можно сделать следующие выводы:

1) отклонение расчетных значений от экспериментальных данных не превышает 1% для всех библиотек оцененных ядерных данных;

2) наиболее точное описание отобранных критических систем показала библиотека РОСФОНД-2020.2 – среднее отклонение по КМС-системам составило  $-0,06 \pm 0,10\%$ ; среднее отклонение по РС-системам составило  $0,05 \pm 0,14\%$ .

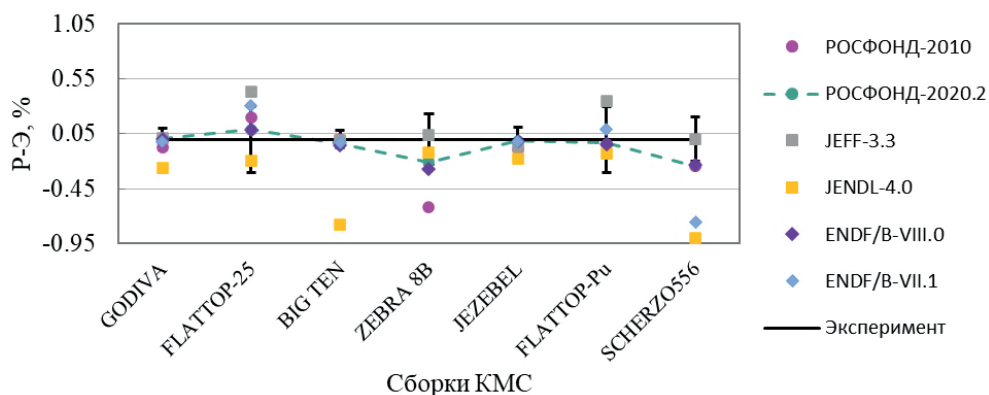


Рис. 2. Расхождение результатов расчета критичности для бенчмарк-моделей типа КМС

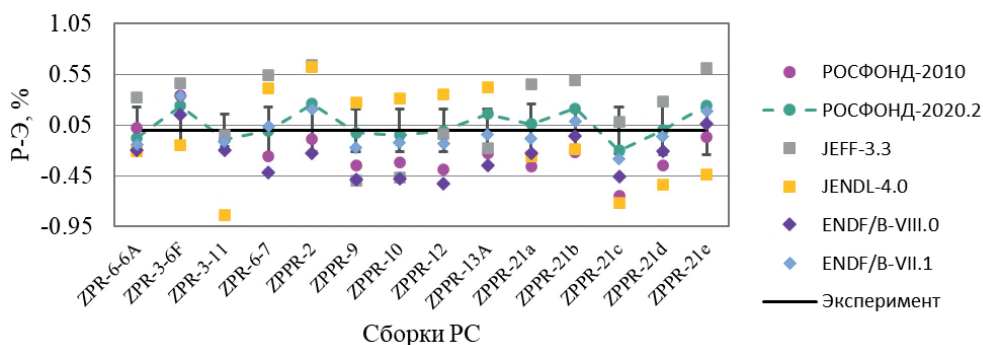


Рис. 3. Расхождение результатов расчета критичности для бенчмарк-моделей типа РС

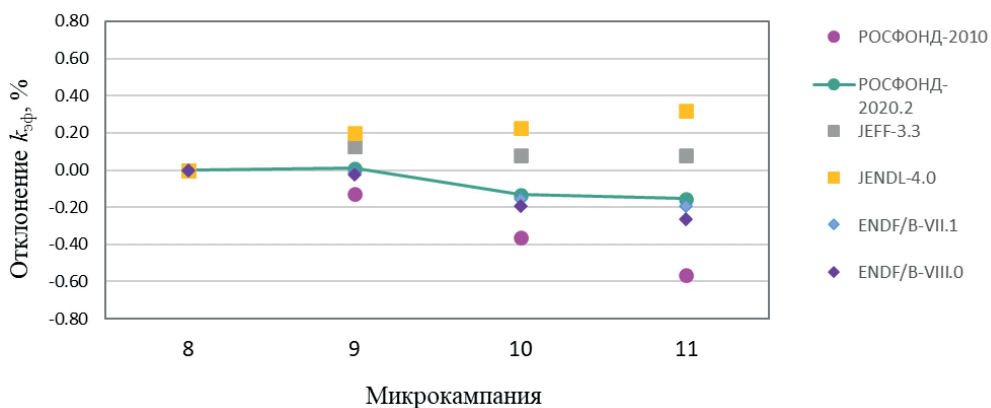


Рис. 4. Изменение значений  $k_{эф}$  по отношению к восьмой микрокампании

Для верификации константного обеспечения на наборе тестовых моделей БН-800 проведена серия расчетов на основе вышеупомянутых библиотек.

На рисунке 4 показаны изменения значений  $k_{эф}$  по отношению к восьмой микрокампании, полученные при расчете тестовых моделей БН-800.

По результатам расчета нейтронно-физических характеристик реактора можно сделать следующие выводы:

- результаты расчетов для БН-800 с использованием системы констант РОСФОНД-2010 и JENDL-4.0 показали тренд к уменьшению (увеличению) величины критичности с загрузкой в активную зону смешанного оксидного уран-плутониевого топлива;

- результаты расчетов БН-800 с использованием библиотеки констант РОСФОНД-2020.2 описывают критичность при переходе на смешанное оксидное уран-плутониевое топливо с точностью  $\sim 0,2\%$ .

Таким образом, рекомендовано использовать файлы оцененных нейтронных данных библиотеки РОСФОНД-2020.2 для формирования групповой библиотеки констант и последующем ее внедрении в практику расчетного сопровождения блоков Белоярской АЭС.

### ФОРМИРОВАНИЕ НОВОЙ СИСТЕМЫ ГРУППОВЫХ КОНСТАНТ

Процесс формирования новой системы групповых констант заключается в создании универсальной по формату библиотеки 28-групповых и 299-групповых констант на основе нейтронных данных РОСФОНД-2020.2.

Данные этой системы констант должны быть представлены в формате с повышенной точностью, который по наполнению аналогичен формату БНАБ-93.

Процесс формирования новой групповой библиотеки нейтронных данных в формате с повышенной точностью был разделен на несколько этапов:

- 1) составление списка нуклидов из файлов библиотеки РОСФОНД-2020.2, необходимых для расчета нейтронно-физических характеристик реакторов на быстрых нейтронах и обоснования безопасности;

- 2) подготовка основных нейтронных сечений для 28 и 299 групп;

- 3) подготовка факторов самоэкранировки и коэффициентов Допплера для той же групповой разбивки;

- 4) формирование системы констант в формате с повышенной точностью;

- 5) перевод библиотеки в бинарный вид.

На первом этапе были отобраны нуклиды из файлов библиотеки РОСФОНД-2020.2, данные которых необходимы при проведении расчетов основных нейтронно-физических характеристик эксплуатирующихся реакторов:

- топливные нуклиды ( $^{235}\text{U}$ ,  $^{238}\text{U}$ ,  $^{238}\text{Pu}$ ,  $^{239}\text{Pu}$ ,  $^{240}\text{Pu}$ ,  $^{241}\text{Pu}$ );
- конструкционные материалы (Al, Cr, Fe, Mo, Nb, Ni, Zr);
- материалы теплоносителя (Na и Pb).

На следующем этапе с помощью программы NJOY [24] файлы библиотеки РОСФОНД-2020.2 были переработаны из формата ENDF-6 [25], в котором хранятся все основные библиотеки ОЯД, в групповой формат.

Далее, после обработки файлов РОСФОНД-2020.2 программой NJOY было сформировано два типа файлов – для 28- и 299-групповой разбивки. На этом шаге были сформированы файлы, содержащие таблицы основных нейтронных сечений, и файлы, содержащие данные о факторах самоэкранировки ( $MF = 4/304$ ) и коэффициентах Допплера ( $MF = 5/305$ ). Файлы готовились при температурах 300, 900, 2100 К в приближении быстрого спектра. Затем выходные файлы были объединены по групповому признаку.

Таблицы  $MF = 5/305$  приведены для основных и реакторных нуклидов, вклады от которых в величину эффекта Допплера являются определяющими.

Данные для природных смесей получены для тех материалов, где это было возможно: Fe, Cr, Ni, Pb, Mo, Zr. Процесс получения констант для природных смесей основан на расчете поточечных данных каждого стабильного изотопа [26].

Процесс сворачивания нейтронных данных стабильных изотопов в микроконстанты для естественной смеси имеет две составляющие.

Сначала выполняется свертка данных, обладающих свойством аддитивности, к которым относятся сечения взаимодействия и их энерго-угловые зависимости.

Затем выполняется свертка данных, которые свойством аддитивности не обладают – данные о резонансной самоэкранировке сечений, так называемые факторы Бондаренко или факторы самоэкранировки.

На основании списка отобранных нуклидов из библиотек нейтронных данных РОСФОНД-2020.2 и РОСФОНД-2010 сформирована и переведена в бинарный вид новая система групповых констант, получившая название БНАБ-РФ22.

## РАСЧЕТ БН-800 С НОВОЙ СИСТЕМОЙ ГРУППОВЫХ КОНСТАНТ

Проведен расчет критичности тестовой модели БН-800 по коду ММККЕНО на начало микрокампании ((МК) для «холодного» состояния реактора с восьмой по одиннадцатую микрокампании. Статистическая погрешность составила  $\pm 0,00003$ .

На рисунке 5 показаны изменения значений  $k_{эф}$  по отношению к восьмой микрокампании при расчете по проектной библиотеке БНАБ-93 и новой системе групповых констант БНАБ-РФ22. Видно, что результаты, полученные с использованием библиотек констант БНАБ-93 и БНАБ-РФ22, не противоречат друг другу.

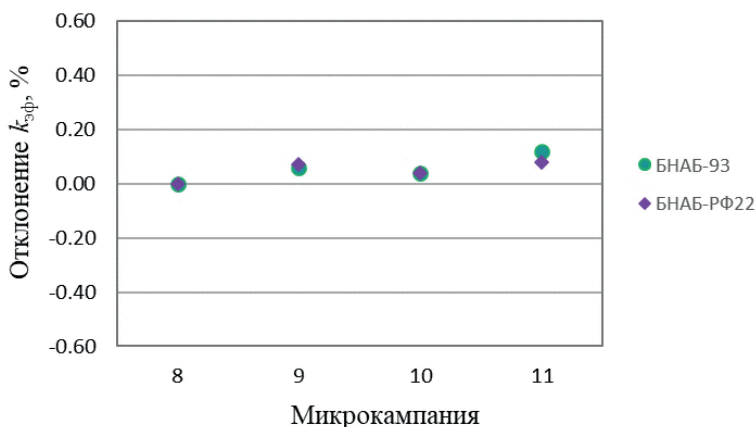


Рис. 5. Изменение значений  $k_{эф}$  по отношению к восьмой микрокампании

Проведена оценка методической составляющей погрешности для тестовых моделей активной зоны БН-800 в период ее перехода на загрузку смешанным оксидным уран-плутониевым топливом с восьмой по одиннадцатую микрокампании. Расчет проведен с использованием проектной библиотеки констант БНАБ-93 и новой системы групповых констант БНАБ-РФ22.

Расчет величины критичности по программе ММККЕНО выполнен в  $P_5$ -приближении в 299-ти группах для гомогенной и гетерогенной тестовой модели. Статистическая погрешность расчета  $k_{эф}$  по программам ММККЕНО и ММКС [27] равна  $10^{-4}$ .

В таблице 1 показаны результат расчета  $k_{эф}$  по программе TRIGEX и полученные к этому результату методические поправки.



Таблица 1

**Результаты расчета  $k_{эф}$  по программе TRIGEX и полученные к этому результату методические поправки**

	8 МК		9 МК		10 МК		11 МК	
	БНАБ-93	БНАБ-РФ22	БНАБ-93	БНАБ-РФ22	БНАБ-93	БНАБ-РФ22	БНАБ-93	БНАБ-РФ22
$k_{эф}$								
TRIGEX_6p	0,9821	0,9844	0,9817	0,9840	0,9802	0,9823	0,9814	0,9834
Методическая поправка, %								
TRIGEX_1p	1,2	1,2	1,2	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3
ММККЕНО (гом.)	0,7	0,6	0,7	0,7	0,7	0,7	0,6	0,6
ММККЕНО (гет.)	1,4	1,3	1,5	1,5	1,6	1,5	1,5	1,4
ММКС (гет.)	–	1,6	–	1,8	–	1,8	–	1,7

По результатам, показанным в таблице, можно сделать выводы о методических поправках к диффузионному расчету:

- кинетическая поправка диффузионного расчета совместно с поправкой на 299-групповой расчет составила около +0,7%;
- гетерогенная поправка изменяется при переходе на смешанное оксидное уран-плутониевое топливо и составила +0,7% для переходной зоны и +0,9% – для активной зоны с МОКС-топливом;
- поправка на 299-групповой расчет не зависит от типа использованного топлива и составляет около +0,3%.

Полная методическая поправка диффузионного расчета составила +1,6% для переходной зоны и 1,7% – для активной зоны со смешанным оксидным уран-плутониевым топливом.

По результатам расчетных исследований стоит отметить следующее:

- изменение методической поправки диффузионного расчета при переходе на смешанное оксидное уран-плутониевое топливо незначительно;
- согласованность вносимых поправок проектной библиотеки констант БНАБ-93 и новой системы групповых констант БНАБ-РФ22;
- с использованием системы групповых констант БНАБ-РФ22 удалось оценить поправку, связанную с 299-групповым расчетом, которая составила 0,3%; при использовании библиотеки БНАБ-93 такой возможности не было ввиду отсутствия преемственности файлов оцененных нейтронных данных и используемых групповых констант;
- использование в диффузионном расчете решения с одной точкой на кассету привело к уменьшению методической поправки и составило +0,4%.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В связи с переходом БН-800 на полную загрузку смешанным оксидным уран-плутониевым топливом и планами по вовлечению в топливный цикл минорных актинидов установленный баланс в константном обеспечении переходит в область повышенной неопреде-



ленности, что ведет к увеличению константной составляющей погрешности.

С целью минимизации методических и константных погрешностей на базе файлов оцененных нейтронных данных РОСФОНД-2020.2 была создана унифицированная система групповых констант БНАБ-РФ22, с одинаковой точностью описывающей как урановую загрузку, так и загрузку смешанным оксидным уран-плутониевым топливом. Процесс формирования новой системы групповых констант включил в себя обновление данных таблиц основных нейтронных сечений, факторов самоэкранировки и коэффициентов Допплера, а также данных о спектрах деления для основных топливных нуклидов.

Основным преимуществом созданной библиотеки констант БНАБ-РФ22 от ее более раннего аналога БНАБ-93 является следующее:

- использование современных оценок нейтронных сечений для топливных и конструкционных материалов;
- наличие 299-групповых данных о сечениях для всех представленных нуклидов в библиотеке (в БНАБ-93 только 16 нуклидов представлены в 299-групповом разбиении);
- наличие нейтронных данных как для смесей изотопов, так и для смесей (в БНАБ-93 отсутствуют данные для отдельных изотопов конструкционных материалов);
- ввиду преемственности файлов оцененных нейтронных данных и подготовленных групповых констант появилась возможность корректной оценки методической составляющей погрешности, связанной с групповым представлением нейтронных сечений; в системе констант БНАБ-93 такая возможность отсутствовала вовсе;
- имеется возможность оперативного пополнения групповой библиотеки констант БНАБ-РФ22 другими оценками нейтронных данных;
- наличие матричного спектра деления для каждого топливного нуклида.

В процессе работы была проведена оценка методической составляющей погрешности для тестовых моделей активной зоны БН-800 при расчете с новой системой групповых констант, которая показала следующее:

- изменение методической поправки диффузионного расчета при переходе на смешанное оксидное уран-плутониевое топливо незначительно;
- согласованность вносимых поправок проектной библиотеки констант БНАБ-93 и новой системы групповых констант БНАБ-РФ22;
- с использованием системы групповых констант БНАБ-РФ22 удалось оценить поправку, связанную с 299-групповым расчетом, которая составила 0,3%; при использовании библиотеки БНАБ-93 такой возможности не было ввиду отсутствия преемственности файлов оцененных нейтронных данных и используемых групповых констант;
- использование в диффузионном расчете решения с одной точкой на кассету привело к уменьшению методической поправки и составило +0,4%.

В дальнейшем планируется обновление других оценок нейтронных данных в оставшихся секциях. Полученную версию системы групповых констант БНАБ-РФ22 планируется внедрить в проектные коды и в состав объединенного унифицированного программного комплекса ГЕФЕСТ-М для расчетного сопровождения БН-600 и БН-800 на Белоярской АЭС.

### **Литература**

1. Ярославцева Л.Н. Комплекс программ JAR для расчета нейтронно-физических характеристик ядерных реакторов. // ВАНТ. Сер. Физика и техника ядерных реакторов. – 1983. – № 8 (37). С. 41–43.

2. Белов А.А., Селезнев Е.Ф. Комплекс программ ГЕФЕСТ. Расчетное сопровождение эксплуатации реактора БН-600 // Атомная энергия. – 2010. – Т. 108. – Вып. 4. – С. 256 – 259. Электронный ресурс: <https://j-atomicenergy.ru/index.php/ae/article/view/1465/1446> (дата доступа 11.03.2024).

3. Асатрян Д.С., Белов А.А., Белоусов В.И., Березнев В.П., Ивченко Д.В., Селезнев Е.Ф. и др. Комплекс программ ГЕФЕСТ800 для проведения эксплуатационных расчетов нейтронно-физических характеристик БН-800 в стационарном режиме. // Атомная энергия. – 2015. Т. 118. – Вып. 6. – С. 303 – 309. Электронный ресурс: <https://www.j-atomicenergy.ru/index.php/ae/article/view/858/837> (дата доступа 11.03.2024).

4. Серезин А.С., Кислицына Т.С. Аннотация комплекса программ TRIGEX-CONSYST-БНАВ-90. Препринт ФЭИ-2655. Обнинск, 1997.

5. Экспертный совет по аттестации программных средств НТЦ ЯРБ. Аттестационный паспорт программы для ЭВМ «ФАКТВР», № 433 от 27.02.2018. Электронный ресурс: [https://www.secncs.ru/expertise/software-review/База\\_аттестационных\\_паспортов\\_июнь\\_2023.pdf](https://www.secncs.ru/expertise/software-review/База_аттестационных_паспортов_июнь_2023.pdf) (дата доступа 14.03.2024).

6. Alcouffe R.E., Brinkley F.W., Marr D.R., O'Dell R.D. User's guide for TWODANT: a code package for two-dimensional, diffusion-accelerated, neutral-particle transport, Los Alamos National Laboratory, Report LA-1049-M, Rev. 1, 1984. DOI: <https://doi.org/10.2172/5985401>

7. Экспертный совет по аттестации программных средств НТЦ ЯРБ. Аттестационный паспорт программы для ЭВМ КАТРИН-2.5, № 357 от 17.04.2014. Электронный ресурс: [https://www.secncs.ru/expertise/software-review/База\\_аттестационных\\_паспортов\\_июнь\\_2023.pdf](https://www.secncs.ru/expertise/software-review/База_аттестационных_паспортов_июнь_2023.pdf) (дата доступа 14.03.2024).

8. Экспертный совет по аттестации программных средств НТЦ ЯРБ. Аттестационный паспорт программы для ЭВМ КАСКАД-3.0, № 460 от 30.05.2019. Электронный ресурс: [https://www.secncs.ru/expertise/software-review/База\\_аттестационных\\_паспортов\\_июнь\\_2023.pdf](https://www.secncs.ru/expertise/software-review/База_аттестационных_паспортов_июнь_2023.pdf) (дата доступа 14.03.2024).

9. MCNP – A General Monte Carlo N-Particle Transport Code, Version 5. Volume I: Overview and Theory. Los Alamos National Laboratory. LA-UR-03-1987. 2003. Электронный ресурс: <https://image.sciencenet.cn/olddata/kexue.com.cn/upload/blog/file/2009/8/200989101523420494.PDF> (дата доступа 14.03.2024).

10. Блыскавка А.А., Мантуров Г.Н., Николаев М.Н., Цибуля А.М. Программный комплекс CONSYST/MMKKENO для расчета ядерных реакторов методом Монте-Карло в многогрупповом приближении с индикатрисами рассеяния в Рn-приближении: Препринт ФЭИ-2887. – Обнинск: ГНЦ РФ – ФЭИ, 2001. – С. 27.

11. Экспертный совет по аттестации программных средств НТЦ ЯРБ. Аттестационный паспорт программы для ЭВМ MCU-FR с банком данных MDBFR60 № 501 от 14.12.2020. Электронный ресурс: [https://www.secncs.ru/expertise/software-review/База\\_аттестационных\\_паспортов\\_июнь\\_2023.pdf](https://www.secncs.ru/expertise/software-review/База_аттестационных_паспортов_июнь_2023.pdf) (дата доступа 14.03.2024).

12. Мантуров Г.Н., Николаев М.Н., Цибуля А.М. Программа подготовки констант CONSYST. Описание применения. Препринт-2828 ГНЦ РФ – ФЭИ. – Обнинск: ГНЦ РФ – ФЭИ, 2000. – 72 с.

13. Мантуров Г.Н., Николаев М.Н., Цибуля А.М. Система групповых констант БНАВ-93. Часть 1. Ядерные константы для расчета нейтронных и фотонных полей излучений. // ВАНТ. Сер.: Ядерные константы. – 1996. – № 1. – С. 59 – 98.

14. Свидетельство о регистрации базы данных БНАВ-93 № 2014620091 от 15.01.2014. Электронный ресурс: <https://www.ippe.ru/images/oyarit/reactor-constants-datacenter/opis/abbn-93.pdf> (дата обращения 14.03.2024).

15. Chadwick M.B., Herman M., Oblozinsky P., Dunn M.E., Danon Y., Kahler A.C., Smith D.L., Pritychenko B., Arbanas G. 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. – Vol. 112. – Iss. 12. – PP. 2887 – 2996. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.nds.2011.11.002>

16. Brown D.A., Chadwick M.B., Capote R., Kahler A.C., Trkov A., Herman M., Sonzogni A.A., Danon Y., Carlson A.D., Dunn M. et al. ENDF/B-VIII.0: The 8th Major Release of the Nuclear Reaction Data Library with CIELO-project Cross Sections, New Standards and Thermal Scattering Data. Nuclear Data Sheets. – 2018. – Vol. 148. – PP. 1–142. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.nds.2018.02.001>
17. The JEFF-3.3.1 Nuclear Data Library, NEA Nuclear Data Services, 2018. Электронный ресурс: <https://www.oecd-nea.org/dbdata/jeff/jeff33/> (дата доступа 14.03.2024).
18. Shibata K. Iwamoto O., Nakagawa T., Ichihara A., Kunieda S., Chiba S., Furutaka K., Otuka N., Ohsawa T., Murata T. et al. JENDL-4.0: A New Library for Nuclear Science and Engineering. // Journal of Nuclear Science and Technology. – 2011. – Vol. 48. – Iss. 1. – С. 1–30. DOI: <https://doi.org/10.3327/jnst.48.1>
19. Забродская С.В., Игнатюк А.В., Кощев В.Н., Манохин В.Н., Николаев М.Н., Проняев В.Г. РОСФОНД – Российская национальная библиотека оцененных нейтронных данных. // ВАНТ. Сер.: Ядерные константы. – 2007, № 1–2. – С. 3–21. Электронный ресурс: <https://vant.ippe.ru/images/pdf/2007/1.pdf> (дата доступа 14.03.2024).
20. Мантуров Г.Н., Забродская С.В., Зуйков А.А., Левченко Ю.В., Мелега Н.А., Мишин В.А., Панова Д.В., Перегудов А.А., Перегудова О.О., Семенов М.Ю., Слюняев М.Н., Тылеева К.В. Состояние разработки баз данных ядерных констант для расчетов быстрых реакторов на основе РОСФОНД и БНАБ-РФ. // ВАНТ. Сер.: Ядерно-реакторные константы. – 2022. – № 3. – С. 19–26. Электронный ресурс: <https://vant.ippe.ru/images/pdf/2022/issue2022-3-19-26.pdf> (дата доступа 14.03.2024).
21. Chadwick M., Capote R., Trkov A., Herman M., Brown D., Hale G.M., Kahler A.C., Talou P., Plompen A., Schillebeeckx P. et al. CIELO collaboration summary results: international valuations of neutron reactions on uranium, plutonium, iron, oxygen and hydrogen. – Nuclear Data Sheets, 2018. – V.148. – PP. 189–213. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.nds.2018.02.003>
22. International Handbook of Evaluated Criticality Safety Benchmark Experiments, NEA/NSC/DOC(95)/03. Paris, 2016.
23. Перегудов А.А., Крячко М.В., Кощев В.Н., Маслов П.А., Тормышев И.В., Семенов М.Ю., Кунцёв Г.А., Гурская О.С., Иванов А.А., Ерпалов П.А. BNcode – усовершенствованный код для научного сопровождения действующих реакторов БН. // ВАНТ. Сер.: Ядерно-реакторные константы. – 2019. № 2. – С. 2–8. DOI: <https://doi.org/10.55176/2414-1038-2019-2-77-86>
24. MacFarlane R.E., Muir D.W., Boicourt R.M., Kahler A.C., Conlin J.L., Haeck W. The NJOY Nuclear Data Processing System. Version 2016. Volume I: User's Manual, LA-UR-17-20093, Los Alamos National Laboratory, 2019. Электронный ресурс: <https://www.njoy21.io/> (дата доступа 15.03.2024).
25. Herman M., Trkov A. ENDF-6 Formats Manual. Report BNL-90365-2009 (ENDF-102) Rev. 1, National Nuclear Data Center Brookhaven National Laboratory, 2010. Электронный ресурс: <https://www.oecd-nea.org/dbdata/data/manual-endf/endf102.pdf> (дата доступа 15.03.2024).
26. Перегудов А.А., Кощев В.Н., Мантуров Г.Н. Методика получения нейтронных групповых констант для материалов – смесей изотопов в системе БНАБ. // Известия высших учебных заведений. Ядерная энергетика. – 2011. – Вып. 2. – С. 43–50. Электронный ресурс: <https://static.nuclear-power-engineering.ru/journals/2011/02.pdf> (дата доступа 15.03.2024).
27. Экспертный совет по аттестации программных средств НТЦ ЯРБ. Аттестационный паспорт программы для ЭВМ ММКС № 474 от 20.11.2019. Электронный ресурс: [https://www.secnrs.ru/expertise/software-review/База\\_аттестационных\\_паспортов\\_июнь\\_2023.pdf](https://www.secnrs.ru/expertise/software-review/База_аттестационных_паспортов_июнь_2023.pdf) (дата доступа 14.03.2024).

Поступила в редакцию 02.04.2024

## Авторы

Аверченкова Елизавета Павловна, инженер-исследователь,

E-mail: [evaverchenkova@ippe.ru](mailto:evaverchenkova@ippe.ru)

Дьяченко Яна Викторовна, инженер-исследователь 1 категории,

E-mail: yavdyachenko@ippe.ru

Забродская Светлана Васильевна, ведущий научный сотрудник, к.ф.-м.н.,

E-mail: szabrodskaya@ippe.ru

Мантуров Геннадий Николаевич, главный научный сотрудник, д.т.н.,

E-mail: gnmanturov@ippe.ru

Мишин Вячеслав Александрович, младший научный сотрудник,

E-mail: vamishin@ippe.ru

Панова Дарья Владимировна, инженер-исследователь,

E-mail: dvpanova@ippe.ru

Перегудов Антон Александрович, начальник департамента расчетных исследований безопасности, к.т.н.,

E-mail: aperegudov@ippe.ru

Семенов Михаил Юрьевич, ведущий научный сотрудник, к.ф.-м.н.,

E-mail: msemenov@ippe.ru

Тормышев Иван Владимирович, ведущий инженер,

E-mail: itormyshev@ippe.ru

Ляпин Евгений Петрович, начальник лаборатории,

E-mail: ojb4-jfl3@belnpp.ru

UDC 539.172.4

### **Generating a System of Group Constants for Neutron-Physical Calculations of Fast Reactors Based on ROSFOND-2020.2 Library Files**

**Averchenkova E.P.<sup>1</sup>, Dyachenko Y.V.<sup>1</sup>, Zabrodskaya S.V.<sup>1</sup>, Manturov G.N.<sup>1</sup>, Mishin V.A.<sup>1</sup>, Panova D.V.<sup>1</sup>, Peregudov A.A.<sup>1</sup>, Semyonov M.Y.<sup>1</sup>, Tormyshev I.V.<sup>1</sup>, Lyapin E.P.<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> IPPE JSC,

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

<sup>2</sup> Belayarsk NPP,

624251, Zarechny, Sverdlovsk reg., Russia

#### **Abstract**

The subject of constant support development is currently becoming increasingly important in connection with the national strategy of transition to a closed nuclear fuel cycle. At the same time, the importance of the tasks of refining calculation models and minimizing methodological, statistical, and constant errors is increasing. In this connection, the idea of creating a universal system of constants describing with equal accuracy both uranium loading and loading with mixed oxide uranium-plutonium fuel and the possibility to perform on its basis both precision Monte Carlo calculations (data format – ACE) and multigroup calculations (formats – BNAB and ANISN) was laid in the basis of this work.

In this paper we analyze the freely available libraries of evaluated nuclear data in order to justify the choice of source files for the formation of a new system of group constants for neutron-physical calculations of fast reactor cores, describe the process of formation of a new library of reactor constants, and verify the obtained system on computational test models of BN-800 reactor and critical systems.

The process of formation of the new system of group constants included selection of initial neutron data files, updating of data tables of basic neutron cross-sections, self-shielding factors and Doppler coefficients, as well as data on fission spectra for the main fuel nuclides.

The methodological component of the error for test models of the BN-800 core was evaluated. Using the BNAB-RF22 system of group constants it was possible to estimate the correction in the 299 groups calculation, which amounted to 0,3%. Previously, when using the BNAB-93 library, there was no such possibility due to the lack of continuity between the files of evaluated neutron data and the group constants used.

**Keywords:** BN-800, ROSFOND-2020.2, evaluated neutron data, constant error, group constants, mixed oxide uranium-plutonium fuel.

**For citation:** Averchenkova E.P., Dyachenko Y.V., Zabrodsкая S.V., Manturov G.N., Mishin V.A., Panova D.V., Peregudov A.A., Semyonov M.Y., Tormyshev I.V., Lyapin E.P. Generating a System of Group Constants for Neutron-Physical Calculations of Fast Reactors Based on ROSFOND-2020.2 Library files. *Izvestiya vuzov. Yadernaya Energetika*. 2024, no. 2, pp. 155–169; DOI: <https://doi.org/10.26583/npe.2024.2.13> (in Russian).

### References

1. Yaroslavtseva L.N. JAR program complex for calculation of neutron-physical characteristics of nuclear reactors. *Voprosy atomnoy nauki i tekhniki. Series: Physics and Technology of Nuclear Reactors*. 1983, no. 8 (37), pp. 41–43 (in Russian).
2. Belov A.A., Seleznev E.F. Calculated support of BN-600 reactor operation. Computational tracking of BN-600 operation. *Atomic Energy*. 2010, vol. 108, no. 4, pp. 321–324 DOI: <https://doi.org/10.1007/s10512-010-9296-x>
3. Asatryan D.S., Belov A.A., Belousov V.I., Bereznev V.P., Ivchenko D.V., Seleznev E.F., Chernova I.S., Koscheev V.N., Manturov G.N., Peregudov A.A., Semenov M.Yu., Tsiulya A.M., Drobyshev Yu.Yu., Karpov S.A., Fedorov I.V. GEFEST800 Software Complex for Performing Real-Time Neutron-Physical Calculations of the BN-800 Reactor in a Stationary Regime. *Atomic Energy*. 2015, vol. 118, pp. 375–381. <https://doi.org/10.1007/s10512-015-0011-9>
4. Seregin A.S., Kislytsyna T.S. *Abstract of the TRIGEX-CONSYST-BNAB-90 program complex*. Preprint IPPE-2655. Obninsk, IPPE Publ., 1997 (in Russian).
5. Expert Council for certification of NTC NRS software tools. Attestation passport of the software tool «FACT BR» (version 1.1), no. 433 dated 27.02.2018 Available at: [https://www.secncs.ru/expertise/software-review/База\\_аттестационных\\_паспортов\\_июнь\\_2023.pdf](https://www.secncs.ru/expertise/software-review/База_аттестационных_паспортов_июнь_2023.pdf) (accessed Mar. 14, 2024) (in Russian).
6. Alcouffe R.E., Brinkley F.W., Marr D.R., O'Dell R.D. *User's guide for TWODANT: a code package for two-dimensional, diffusion-accelerated, neutral-particle transport*. Los Alamos National Laboratory, Report LA-1049-M, Rev. 1, 1984. DOI: <https://doi.org/10.2172/5985401>
7. Expert Council for certification of NTC NRS software tools. Attestation passport of the computer program KATRIN-2.5, no. 357 dated 17.04.2014. Available at: [https://www.secncs.ru/expertise/software-review/База\\_аттестационных\\_паспортов\\_июнь\\_2023.pdf](https://www.secncs.ru/expertise/software-review/База_аттестационных_паспортов_июнь_2023.pdf) (accessed Mar. 14, 2024) (in Russian).
8. Expert Council for certification of NTC NRS software tools. Attestation passport of the computer program CASCADE-3.0, no. 460 dated 30.05.2019. Available at: [https://www.secncs.ru/expertise/software-review/База\\_аттестационных\\_паспортов\\_июнь\\_2023.pdf](https://www.secncs.ru/expertise/software-review/База_аттестационных_паспортов_июнь_2023.pdf) (accessed Mar. 14, 2024) (in Russian).
9. *MCNP – A General Monte Carlo N-Particle Transport Code, Version 5. Volume 1: Overview and Theory*. Los Alamos National Laboratory. LA-UR-03-1987, 2003. Available at: <https://image.sciencenet.cn/olddata/kexue.com.cn/upload/blog/file/2009/8/200989101523420494.PDF> (accessed Mar. 14, 2024).
10. Blyskavka A.A., Manturov G.N., Nikolaev M.N., Tsiulya A.M. *Program Complex CONSYST/MMKKENO for Calculation of Nuclear Reactors by Monte Carlo Method in Multigroup Approximation with Scattering Indicatrices in Rp Approximation*. IPPE Preprint-2887. Obninsk, IPPE Publ., 2001, 27 p. (in Russian).
11. Expert Council for certification of NTC NRS software. Certification passport of MCU-FR computer pro-



gram with MDBFR60 data bank no. 501 dated 14.12.2020. Available at: [https://www.secnrs.ru/expertise/software-review/База\\_аттестационных\\_паспортов\\_июнь\\_2023.pdf](https://www.secnrs.ru/expertise/software-review/База_аттестационных_паспортов_июнь_2023.pdf) (accessed Mar. 14, 2024) (in Russian).

12. Manturov G.N., Nikolaev M.N., Tsibulya A.M. *CONSYST code for neutron constants preparation. Scope statement*. Preprint IPPE-2828. Obninsk, IPPE Publ., 2000, 72 p. (in Russian).

13. Manturov G.N., Nikolaev M.N., Tsibulya A.M. System of group constants BNAB-93. Part 1. Nuclear constants for calculation of neutron and photon radiation fields. *Voprosy atomnoy nauki i tekhniki. Series: Nuclear Constants*. 1996, vol. 1, pp. 59–98.

14. Certificate of registration of the BNAB-93 database no. 2014620091 dated 15.01.2014. Available at: <https://www.ippe.ru/images/oyarit/reactor-constants-datacenter/opis/abbn-93.pdf> (accessed Mar. 14, 2024) (in Russian).

15. Chadwick M.B., Herman M., Oblozinsky P., Dunn M.E., Danon Y., Kahler A.C., Smith D.L., Pritychenko B., Arbanas G. 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, vol. 112, iss. 12, pp. 2887–2996. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.nds.2011.11.002>

16. Brown D.A., Chadwick M.B., Capote R., Kahler A.C., Trkov A., Herman M., Sonzogni A.A., Danon Y., Carlson A.D., Dunn M. et al. ENDF/B-VIII.0: The 8th Major Release of the Nuclear Reaction Data Library with CIELO-project Cross Sections, New Standards and Thermal Scattering Data. *Nuclear Data Sheets*. 2018, vol. 148, pp. 1–142. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.nds.2018.02.001>

17. The JEFF-3.3.1 Nuclear Data Library, NEA Nuclear Data Services, 2018. Available at: <https://www.oecd-nea.org/dbdata/jeff/jeff33/> (accessed Mar. 14, 2024).

18. Shibata K. Iwamoto O., Nakagawa T., Ichihara A., Kunieda S., Chiba S., Furutaka K., Otuka N., Ohsawa T., Murata T. et al. JENDL-4.0: A New Library for Nuclear Science and Engineering. *Journal of Nuclear Science and Technology*. 2011, vol. 48, iss. 1, pp. 1–30. DOI: <https://doi.org/10.3327/jnst.48.1>

19. Zabrodskaya S.V., Ignatyuk A.V., Koscheev V.N. Manokhin V.N., Nikolaev M.N., Pronyaev V.G. ROS-FOND – Russian National Library of Evaluated Neutron Data. *Voprosy atomnoy nauki i tekhniki. Series: Nuclear Constants*. 2007, no. 1–2, pp. 3–21. Available at: <https://vant.ippe.ru/images/pdf/2007/1.pdf> (accessed Mar. 14, 2024) (in Russian).

20. Manturov G.N., Zabrodskaya S.V., Zuiikov A.A., Levchenko Y.V., Melega N.A., Mishin V.A., Panova D.V., Peregudov A.A., Peregudova O.O., Semyonov M.Yu. Development status of the nuclear constants databases for fast reactor calculations on the basis of ROSFOND and BNAB-RF. *Voprosy atomnoy nauki i tekhniki. Series: Nuclear Reactor Constants*. 2022, no. 3, pp. 19–26. Available at: <https://vant.ippe.ru/images/pdf/2022/issue2022-3-19-26.pdf> (accessed Mar. 14, 2024) (in Russian).

21. Chadwick M., Capote R., Trkov A., Herman M., Brown D., Hale G.M., Kahler A.C., Talou P., Plompen A., Schillebeeckx P. et al. CIELO collaboration summary results: international valuations of neutron reactions on uranium, plutonium, iron, oxygen and hydrogen. *Nuclear Data Sheets*. 2018, vol. 148, pp. 189–213. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.nds.2018.02.003>

22. International Handbook of Evaluated Criticality Safety Benchmark Experiments, NEA/NSC/DOC(95)/03. Paris, 2016.

23. Peregudov A.A., Kryachko M.V., Koscheev V.N., Maslov P.A., Tormyshev I.V., Semyonov M.Yu.1, Kuntsio G.A., Gurskaya O.S., Ivanov A.A., Erpalov P.A. BNcode – Advanced Code for Scientific Support of Operating BN Reactors. *Voprosy atomnoy nauki i tekhniki. Series: Nuclear Reactor Constants*. 2019, no 2, pp. 2–8. DOI: <https://doi.org/10.55176/2414-1038-2019-2-77-86> (in Russian).

24. MacFarlane R.E., Muir D.W., Boicourt R.M., Kahler A.C., Conlin J.L., Haecck W., The NJOY Nuclear Data Processing System. Version 2016. Volume I: User's Manual, LA-UR-17-20093, Los Alamos National Laboratory, 2019. Available at: <https://www.njoy21.io/> (accessed Mar. 15, 2024).

25. Herman M., Trkov A. ENDF-6 Formats Manual. Report BNL-90365-2009 (ENDF-102) Rev. 1, National

Nuclear Data Center Brookhaven National Laboratory, 2010. Available at: <https://www.oecd-nea.org/dbdata/data/manual-endf/endf102.pdf> (accessed Mar. 15, 2024).

26. Peregudov A.A., Koshcheev V.N., Manturov G.N. Methodology for obtaining neutron group constants for materials – mixtures of isotopes in the BNAB system. *Izvestia Vysshikh Uchebnykh Zawedeniy. Yadernaya Energetika*. 2011, no. 2. pp. 43–50. Available at: <https://static.nuclear-power-engineering.ru/journals/2011/02.pdf> (accessed Mar. 15, 2024). (in Russian).

27. Expert Council on certification of program means of STC NRS. Attestation passport of MMKC computer program no. 474 dated 20.11.2019. Available at: [https://www.secncs.ru/expertise/software-review/База\\_аттестационных\\_паспортов\\_июнь\\_2023.pdf](https://www.secncs.ru/expertise/software-review/База_аттестационных_паспортов_июнь_2023.pdf) (accessed Mar. 14, 2024) (in Russian).

### Authors

Elizaveta P. Averchenkova, research engineer,

E-mail: [epaverchenkova@ippe.ru](mailto:epaverchenkova@ippe.ru)

Yana V. Dyachenko, research engineer, 1st category,

E-mail: [yavdyachenko@ippe.ru](mailto:yavdyachenko@ippe.ru)

Svetlana V. Zabrodsкая, leading researcher, Cand. Sci. (Phys.-Math.),

E-mail: [szabrodsкая@ippe.ru](mailto:szabrodsкая@ippe.ru)

Gennady N. Manturov, Chief Researcher, Dr. Sci. (Engineering),

E-mail: [gnmanturov@ippe.ru](mailto:gnmanturov@ippe.ru)

Vyacheslav A. Mishin, junior researcher,

E-mail: [vamishin@ippe.ru](mailto:vamishin@ippe.ru)

Daria V. Panova, research engineer,

E-mail: [dvpanova@ippe.ru](mailto:dvpanova@ippe.ru)

Anton A. Peregudov, head of department of calculated safety research, Cand. Sci. (Engineering),

E-mail: [aperegudov@ippe.ru](mailto:aperegudov@ippe.ru)

Mikhail Yu. Semenov, leading researcher, Cand. Sci. (Phys.-Math.),

E-mail: [msemenov@ippe.ru](mailto:msemenov@ippe.ru)

Ivan V. Tormyshev, leading engineer,

E-mail: [itormyshev@ippe.ru](mailto:itormyshev@ippe.ru)

Evgeny P. Lyapin, head of laboratory,

E-mail: [ojb4-jf13@belnpp.ru](mailto:ojb4-jf13@belnpp.ru)