

## УЧЕТ ГЕТЕРОГЕННЫХ ЭФФЕКТОВ ПРИ ПОДГОТОВКЕ МНОГОГРУППОВЫХ НЕЙТРОННЫХ КОНСТАНТ В СИСТЕМЕ CONSYST/БНАБ-РФ

**О.Н. Андрианова, Г.М. Жердев, Г.Б. Ломаков, Г.Н. Мантуров,  
Е.С. Теплухина**

**АО «ГНЦ РФ-ФЭИ»**

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



Необходимость в создании взаимосогласованных расчетных моделей для прецизионных и инженерных нейтронно-физических кодов обусловлена требованиями к аттестации и верификации программного и константного обеспечения в соответствии с Положением о проведении верификации и экспертизы программных средств по направлению «Нейтронно-физические расчеты» (РБ-061-11). Ключевым требованием РБ-061-11 является реализация методически прозрачной и воспроизводимой процедуры оценки методического и константного компонентов погрешности расчета, которая может быть выполнена только при наличии взаимосогласованных расчетных моделей. В работе на примере серии измерений, выполненных на трех критических конфигурациях БФС-61, обсуждаются факторы, которые необходимо учитывать при создании такого рода моделей, и особенности их применения для расчетов нейтронно-физических характеристик критических сборок БФС. Продемонстрированы улучшенные функциональные возможности актуализированного программного и константного обеспечения для расчетно-экспериментального анализа интегральных экспериментов на БФС (РОСФОНД/БНАБ-РФ, CONSYST и ММК-РФ), позволяющие существенно сократить время и минимизировать вероятность возникновения ошибок при составлении взаимосогласованных расчетных моделей для различных кодов и корректно оценивать методический и константный компоненты погрешности расчетов в соответствии с РБ-061-11. Приведены результаты оценки константной погрешности, обусловленной групповым приближением. На основании анализа полученных результатов показано, что при переходе от библиотеки оцененных нейтронных данных РОСФОНД к ее групповой версии БНАБ-РФ расхождение в расчетах критических конфигураций сборки БФС-61 не превышает 0,3% в критичности (гетерогенная поправка 0,2 – 0,8%). Смещения результатов расчета спектральных индексов находятся в пределах статистической погрешности метода Монте-Карло. По результатам расчетно-экспериментального анализа всей совокупности измерений, выполненных на серии сборок БФС-61, оптимальной системой констант является библиотека РОСФОНД.

**Ключевые слова:** интегральные эксперименты, БФС, эффективный коэффициент размножения нейтронов, константная погрешность, метод Монте-Карло, РОСФОНД, БНАБ-РФ, спектральные индексы.

## ВВЕДЕНИЕ

Целью работы является демонстрация улучшенных функциональных возможностей актуализированного программного и константного обеспечения для расчетно-экспериментального анализа интегральных экспериментов на сборках БФС (на примере критическихборок БФС-61). Указанные возможности позволяют существенно сократить время и минимизировать вероятность возникновения ошибок при составлении моделей, создавать взаимосогласованные модели для прецизионных и инженерных кодов, а также оценивать методический и константный компоненты погрешностей, необходимые при верификации и аттестации расчетных кодов в соответствии с Положением РБ-061-11 [1]. Погрешности инженерных расчетов, согласно РБ-061-11 (пп. 13 – 15), определяются путем сравнения результатов расчетов с соответствующими результатами, полученными по прецизионным (реперным) кодам (п. 22). Одной из самых распространенных в мире зарубежных программ такого рода является американская программа MCNP [2]. Среди российских аналогов широкое распространение получила программа MSU [3]. Для обеих этих программ характерно то, что они снабжены универсальным геометрическим модулем. Однако универсальность приводит к повышению временных затрат, поэтому для ускорения выполнения расчетов типовых систем целесообразно использовать адаптированный и оптимизированный геометрический модуль.

Разработанная в ГНЦ РФ-ФЭИ программа ММКК [4] (в ранних публикациях использовалось название ММККЕНО) обладает существенно бо льшим (в разы) быстродействием благодаря специализированному геометрическому модулю с широкими возможностями, охватывающими основные потребности описания компоновок как реакторных установок, так и критическихборок БФС. Реализованные в последней версии программы ММК-РФ [5, 6] возможности регистрации потока нейтронов и вычисление усредненных по потоку сечений взаимодействия нейтронов для независимой геометрической сетки (аналогично MCNP) позволяют сократить время постобработки результатов расчета экспериментов на БФС. Благодаря оптимизированным функциональным возможностям программа ММК-РФ значительно превосходит по быстродействию зарубежные и отечественные аналоги при проведении расчетно-экспериментальных исследований на критическихбороках БФС.

Оценка константной составляющей погрешности должна выполняться на основании сопоставления результатов расчетов бенчмарк-экспериментов, выполненных по кодам, реализующим метод Монте-Карло, в детальном и групповом представлении сечений нейтронных взаимодействий. Расчетное описание экспериментов на сборках БФС в групповом представлении нейтронных сечений сопряжено с задачей корректного учета эффектов резонансной самоэкранировки сечений вследствие гетерогенного размещения материалов [7, 8]. В системе подготовки групповых констант CONSYST [9] реализованы приближенные и сравнительно простые для пользователя методы подготовки групповых констант, позволяющие корректно учитывать эффекты пространственной гетерогенности.

## СПЕЦИФИКАЦИЯ БЕНЧМАРК-ЭКСПЕРИМЕНТОВ НА СБОРКАХ БФС-61

Критические сборки серии БФС-61 были собраны в 1990 г. на стенде БФС-1 для изучения характеристик реакторных установок со свинцовым теплоносителем. В 2009 г. была выполнена оценка экспериментов на критическихбороках БФС-61 для международных справочников оцененных бенчмарк-экспериментов [10, 11].

Сборки БФС-61 (рис. 1) имели типовую компоновку и были составлены из стальных труб, заполненных таблетками металлического плутония, обедненного металлического урана, свинца, графита и пр. Сборка БФС-61-0 (рис. 1а) имела трехслойный боковой отражатель, состоящий из свинца (таблетки свинца двух типов), стали и двуокиси обедненного урана. В сборке БФС-61-1 (рис. 1б) использовался двухслойный отражатель,

состоящий из свинца и двуокиси урана. В сборке БФС-61-2 (рис. 1в) отражатель был однослойным и состоял из двуокиси обедненного урана. В межтрубных зазорах отражателя размещались вытеснители из нержавеющей стали.

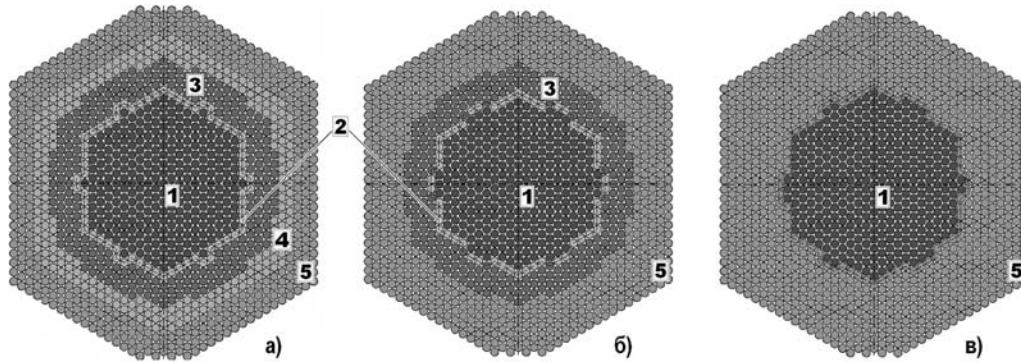


Рис.1. Картограммы сборки: а) – БФС-61-0; б) – БФС-61-1; в) – БФС-61-2 [10, 11]. Цифрами обозначены трубы: 1 – активной зоны; 2 – свинцового отражателя первого типа; 3 – свинцового отражателя второго типа; 4 – стального отражателя; 5 – отражателя из двуокиси обедненного урана

В программу экспериментальных исследований на сборках БФС-61 входили измерения отношений сечений взаимодействия нейтронов ( $\langle \sigma_f^i \rangle / \langle \sigma_f^j \rangle$ ), усредненных по спектру в некоторой точке критической сборки (спектральные индексы), содержащие в себе богатую информацию о свойствах изучаемой композиции реактора на быстрых нейтронах [12 – 14]. По определению

$$\langle \sigma_x^i \rangle / \langle \sigma_f^j \rangle = \int_E \varphi(E) \sigma_i^x dE / \int_E \varphi(E) \sigma_f^j dE,$$

где  $\varphi(E)$  – спектральная плотность потока нейтронов;  $\langle \rangle$  – символ усреднения по энергии;  $i, j$  – тип изотопа;  $x$  – тип реакции (например,  $f$  – деление). На сборках БФС-61 малогабаритной камерой деления (МКД) были выполнены измерения отношения среднего сечения деления изотопов  $^{232}\text{Th}$ ,  $^{233}, ^{238}\text{U}$ ,  $^{239}\text{Pu}$  к среднему сечению деления  $^{235}\text{U}$  и отношения среднего сечения деления минорных актиноидов  $^{238}, ^{240}, ^{241}, ^{242}\text{Pu}$ ,  $^{241}\text{Am}$ ,  $^{237}\text{Np}$  к среднему сечению деления  $^{239}\text{Pu}$ .

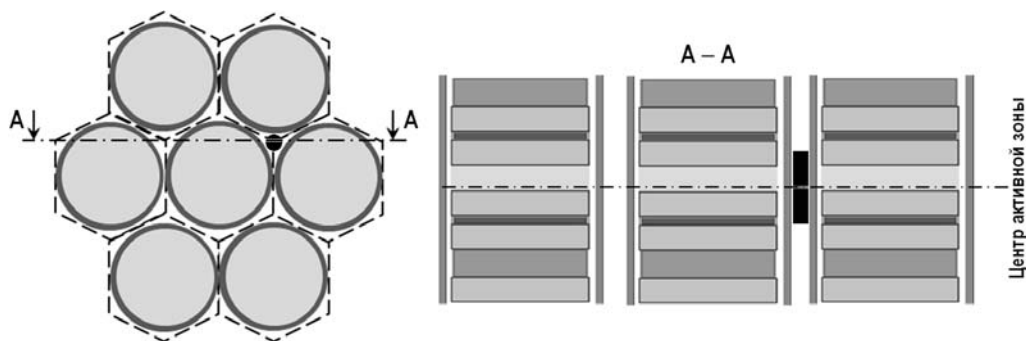


Рис. 2. Схема размещения малогабаритной камеры деления (проекции МКД выделены черным)

Конструкция МКД описана в справочнике [11]. Корпус камеры представляет собой трубку из нержавеющей стали диаметром 6 мм и длиной 140 мм с толщиной стенки 0,5 мм. Внутри камеры закреплена другая трубка диаметром 4 мм и длиной 40 мм с толщиной стенки 0,2 мм, на поверхность внутренней стороны которой нанесен слой делящегося материала высотой 30 мм. Камера заполнена аргоном под давлением 10 атм.

При измерениях спектральных индексов камеру устанавливают таким образом, что-

бы середина слоя делящегося материала, расположенного внутри камеры, совпадала с центральной плоскостью активной зоны сборки (с серединой топливной композиции в центральной трубе). На рисунке 2 показана типовая схема размещения малогабаритной камеры деления в межтрубном пространстве.

### ОЦЕНКА КОНСТАНТНОГО И МЕТОДИЧЕСКОГО КОМПОНЕНТОВ ПОГРЕШНОСТИ РАСЧЕТА

Процедура оценки эксперимента подразумевает, что при описании математической модели в расчетном значении должны быть указаны и оценены вклады от всех принятых упрощений и приближений используемых методик. Целесообразно оценки этих упрощений и приближений выполнять последовательно, опираясь на результаты расчета по прецизионной модели. Схематически процедура проведения расчетов для оценки погрешностей показана на рис. 3.

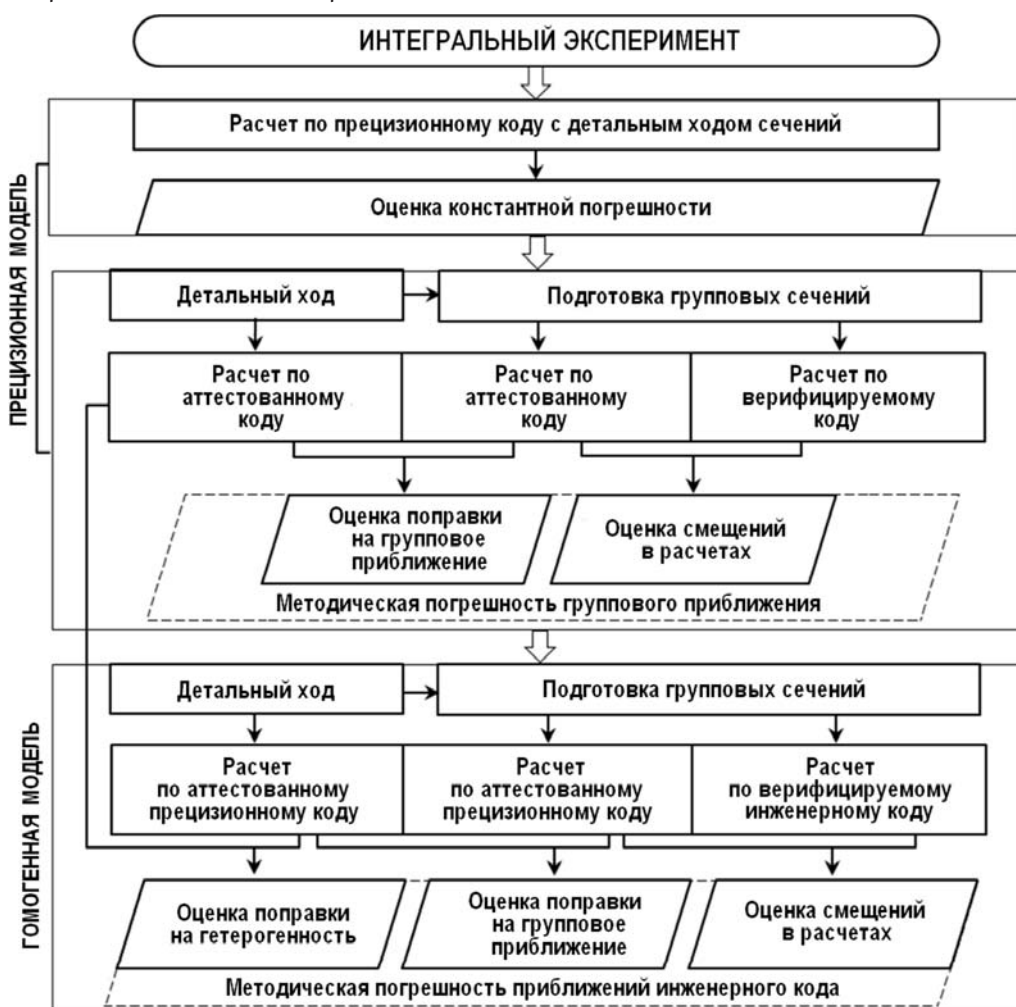


Рис. 3. Схема последовательности проведения расчетов для оценки погрешностей функционалов

На первом этапе составляется расчетная модель для прецизионного кода, реализующего метод Монте-Карло и позволяющего проводить расчеты с детальным представлением хода нейтронных сечений без введения каких-либо методических приближений и упрощений, связанных с описанием реальной геометрии и материального состава сборки.

На втором этапе, опираясь на указанную выше расчетную модель, переходить на многогрупповые расчеты, оценивая константную составляющую погрешности путем сопоставления результатов двух расчетов. На данном этапе также можно оценить методическую составляющую погрешности, связанную с реализацией группового приближения в другом конкретном коде, использующем метод Монте-Карло [14]. При этом расчетные модели на эти коды должны быть полностью идентичны и иметь единое расчетное задание на подготовку макроконстант.

На третьем этапе может быть осуществлен переход от прецизионного описания компоновки и композиции сборки к гомогенизированным составам, при этом вносятся изменения в расчетную модель в части описания геометрии.

Сравнение результатов расчетов по коду, основанному на методе Монте-Карло, с детальным представлением нейтронных сечений для гомогенной и гетерогенной моделей дает возможность оценить расчетную поправку на гетерогенность. С помощью прецизионных расчетов могут быть определены следующие компоненты погрешности: константный, методический (связанный с групповым приближением) и погрешность, обусловленная переходом к гомогенной модели.

При сравнении результатов расчетов по гомогенным моделям, выполненных по различным инженерным кодам, с результатом расчета той же модели по прецизионному коду на единой константной базе можно оценить погрешности приближений, заложенных в инженерные коды.

### УЧЕТ ГЕТЕРОГЕННЫХ ЭФФЕКТОВ В СИСТЕМЕ CONSYST

В системе CONSYST реализованы разные способы учета гетерогенных эффектов при подготовке многогрупповых макроскопических сечений, основанных на принципе эквивалентности гомогенных и гетерогенных сред (теоремы эквивалентности):

- «ручной» ввод поправок – пользователь имеет возможность вручную вычислить поправки к сечению разбавления а) вводом фиктивного изотопа  $\delta$ -рассеивателя, б) путем выделения дополнительных материальных зон блокировки;
- автоматическое вычисление поправок – система может автоматически вычислить величины поправок, если пользователь описал реальную гетерогенную структуру с помощью блока GETER.

В режиме «ручного» ввода поправок для учета пространственной гетерогенности необходимо рассчитать концентрации фиктивных материалов.

Во-первых, если размеры однородной области сравнимы с длиной свободного пробега, а в ее состав входят изотопы с резонансным ходом сечений, то в этой области может быть введен фиктивный изотоп с именем «D-SC» – так называемый  $\delta$ -рассеиватель, не вносящий изменений в процесс переноса нейтронов, а влияющий на учет резонансной самоэкранировки сечений. Полное сечение  $\delta$ -рассеивателя равно 1 барн, а средний косинус угла рассеяния равен единице. Концентрация  $\delta$ -рассеивателя выбирается равной  $1/l$ , где  $l = 4V/S$  – средняя хорда или среднее значение длины пути нейтрона в зоне без учета столкновений;  $V$  – объем;  $S$  – площадь поверхности.

Во-вторых, в системе CONSYST предусмотрено два класса материальных зон, различающихся нуклидным составом – материальные зоны блокировки и физические зоны. Зоны блокировки служат для расчета факторов резонансной самоэкранировки, а расчет нейтронных полей проводится в системе, состоящей из физических зон, для каждой из которых ставится в соответствие зона блокировки. В качестве зоны блокировки может быть выбрана зона с гомогенным составом, заключающая в себе набор физических зон (трубу, таблетки различных материалов и пр.).

Учет гетерогенных эффектов можно выполнять, передавая в CONSYST информацию о реальной ячеечной структуре среды. В этом случае программой будет произведен



пересчет сечений разбавления резонансных изотопов с учетом конкретной геометрии гетерогенной ячейки с вычислением поправок в сечение разбавления:

- поправки Данкова, учитывающей взаимодействие блоков в бесконечной периодической решетке;
- фактора Белла, зависящего от толщины блока [8].

Концентрации  $\delta$ -рассеивателя для всех материалов будут вычислены автоматически.

Другим важным изменением в системе CONSYST является самостоятельное определение системой, для каких зон и как учитывать анизотропию полного сечения. Для этого пользователю достаточно задать соответствующий индикатор.

## РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ И ИХ СОПОСТАВЛЕНИЕ

Расчеты нейтронно-физических характеристик для трех конфигураций БФС-61 были выполнены по кодам ММК, ММК-РФ и MCNP. Значения и статистическая погрешность расчетов (значения в скобках – абсолютная статистическая погрешность, умноженная на  $10^5$ ) критичности для каждой конфигурации сборки БФС-61 приведены в табл. 1. Подготовка многогрупповых блокированных констант для кодов ММК и MCNP осуществлена с помощью CONSYST-RF [15, 16] с включением блока GETER. Расчеты проводились с использованием подгрупп для  $^{238}\text{U}$ ,  $^{239}\text{Pu}$  и природной смеси Fe, при этом общее число групп составило 1520. Проведены дополнительные расчеты с детальной энергетической зависимостью сечений по программе MCNP и ММК-РФ с библиотеками РОСФОНД [17] и БНАБ-РФ [18, 19].

Значения, приведенные в пятом и шестом столбцах табл. 1, демонстрируют, что учет гетерогенных поправок в системе CONSYST-RF в «ручном» и автоматическом режимах не приводит к изменениям в результатах расчетов. В последней строке таблицы приводится время расчета на одноплатном процессоре (на одной и той же ЭВМ) по кодам MCNP, ММК и ММК-РФ, необходимое для достижения статистической погрешности  $k_{\text{эфф}}$ , равной  $\pm 0,00020$ , что соответствует 10 млн. активных историй нейтронов. Благодаря специализированному геометрическому модулю коды ММК и ММК-РФ имеют преимущества перед кодом MCNP по скорости расчета в три – четыре раза и более в отдельных случаях.

Таблица 1

### Результаты сравнения расчетов критичности для различных кодов и библиотек

Конфигурация БФС-61	ММК-РФ		MCNP		ММКК	ММКК
	Взаимосогласованная расчетная модель					Модель [10]
	РОСФОНД	БНАБ-РФ	РОСФОНД	БНАБ-РФ GETER	БНАБ-РФ GETER	БНАБ-РФ
БФС-61-0	0,99661(20)	0,99131(21)	0,99663(21)	1,00008(20)	0,99969(21)	0,99932(21)
БФС-61-1	0,99463(19)	0,99094(21)	0,99475(20)	0,99974(20)	0,99671(21)	0,99674(21)
БФС-61-2	0,99398(19)	0,99068(20)	0,99377(20)	0,99733(20)	0,99507(21)	0,99499(20)
Время, мин	56	50	262	156	48	

По результатам расчетов, приведенных в таблице, оценена величина константной составляющей расчетной погрешности, обусловленной переходом от детального представления сечений к групповому приближению, для рассмотренных систем она составляет  $\sim 0,3\%$ . Учет пространственной гетерогенности при подготовке макроскопических констант приводит к уточнению расчета критичности на  $0,8\%$ .

Выполнены расчеты спектральных характеристик, измеренных МКД в межтрубном зазоре справа от центральной трубы сборки БФС-61-0 в центральной плоскости активной зоны (см. рис. 2). В расчетной модели МКД представлялась как цилиндр диамет-

ром 4 мм и высотой 3 см в соответствии с высотой нанесенного слоя делящегося материала в реальном описании МКД [10].

Базовая версия программы ММКК помимо результатов расчетов критичности может выдавать поток в заданной зоне с той же энергетической структурой, с которой система CONSYST подготовила макроскопические сечения. Таким образом, программа ММКК в отличие от MCNP не снабжена возможностями вычисления интегралов вида  $\int \varphi(E) dE$  и  $\int \varphi(E) \sigma_x(E) dE$ . Вычисление таких интегралов требует привлечения дополнительных программ постобработки результатов расчета. Усовершенствованная версия ММКК – ММК-РФ [5, 6] помимо возможности вычисления любых видов свертки с потоком снабжена независимой геометрической сеткой для выделения цилиндрических или сферических областей регистрации потока нейтронов.

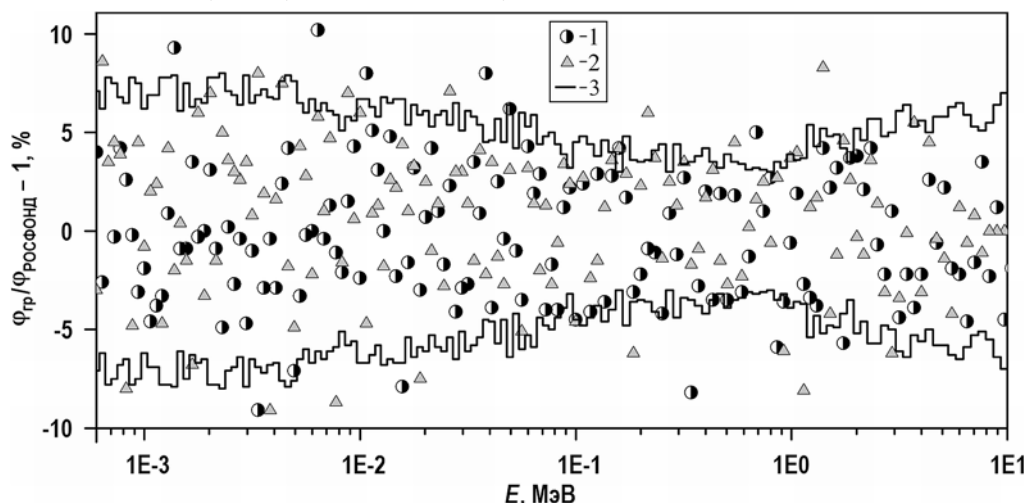


Рис. 4. Отклонения в расчетах спектра нейтронов сборки БФС-61-0, вычисленного по групповой библиотеке БНАБ-РФ и кодам MCNP (1) и ММК-РФ (2) к спектру нейтронов, рассчитанному по коду MCNP с библиотекой РОСФОНД; 3 – статистическая погрешность расчета спектра (3σ)

Таблица 2  
**Расчетные значения скоростей деления, измеренные на сборке БФС-61-0**

Индекс	Эксперимент	Расчет	
		ММК-РФ	MCNP
$\sigma_f^{Th-232}/\sigma_f^{U-235}$	$0,00947 \pm 0,0003$	$0,00730 \pm 0,00003$	$0,00724 \pm 0,00004$
$\sigma_f^{U-233}/\sigma_f^{U-235}$	$1,513 \pm 0,03$	$1,4666 \pm 0,0035$	$1,4673 \pm 0,006$
$\sigma_f^{U-238}/\sigma_f^{U-235}$	$0,0320 \pm 0,0008$	$0,0307 \pm 0,0001$	$0,0305 \pm 0,0002$
$\sigma_f^{Pu-239}/\sigma_f^{U-235}$	$1,057 \pm 0,015$	$1,0337 \pm 0,003$	$1,046 \pm 0,005$
$\sigma_f^{Pu-240}/\sigma_f^{Pu-239}$	$0,2575 \pm 0,007$	$0,2674 \pm 0,0008$	$0,2646 \pm 0,002$
$\sigma_f^{Pu-241}/\sigma_f^{Pu-239}$	$1,259 \pm 0,03$	$1,2936 \pm 0,003$	$1,2885 \pm 0,006$
$\sigma_f^{Pu-242}/\sigma_f^{Pu-239}$	$0,1883 \pm 0,005$	$0,1908 \pm 0,0007$	$0,1890 \pm 0,0009$
$\sigma_f^{Am-241}/\sigma_f^{Pu-239}$	$0,1963 \pm 0,005$	$0,1935 \pm 0,0006$	$0,1965 \pm 0,0009$

На рисунке 4 показаны результаты расчетов потока нейтронов в цилиндрической области, соответствующей регистрационной области в МКД, по коду MCNP с детальным ходом сечений (библиотека РОСФОНД) и групповым представлением констант (библиотека БНАБ-РФ, 1520 групп) и коду ММКК с групповым представлением констант (библиотека БНАБ-РФ, 1520 групп).

Как видно из графика, результаты расчетов спектров нейтронов в групповом и де-

тельном представлении нейтронных сечений хорошо согласуются в пределах статистической погрешности расчетов. На основании этих энергетических распределений потоков нейтронов могут быть вычислены спектральные индексы.

В таблице 2 приведены результаты расчетов спектральных индексов, измеренных МКД на сборке БФС-61-0, а именно: отношения среднего сечения деления изотопов  $^{232}\text{Th}$ ,  $^{233}\text{U}$ ,  $^{238}\text{U}$ ,  $^{239}\text{Pu}$  к среднему сечению деления  $^{235}\text{U}$  и отношения среднего сечения деления минорных актиноидов  $^{240}\text{Pu}$ ,  $^{241}\text{Pu}$ ,  $^{242}\text{Pu}$  и  $^{241}\text{Am}$  к среднему сечению деления  $^{239}\text{Pu}$ . Расчеты по коду ММК-РФ были выполнены с использованием независимой сетки и автоматизированной свертки потока нейтронов с сечением  $\int \varphi(E)\sigma_x(E)dE$ .

Приведенные в таблице данные демонстрируют хорошее согласие результатов расчетов спектральных индексов, полученных по кодам MCNP и ММК-РФ с использованием библиотеки РОСФОНД.

### АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ

О качестве результатов расчетов критичности по различным библиотекам (РОСФОНД, БНАБ-РФ и БНАБ-93) и измерений спектральных индексов можно судить по данным, приведенным в табл. 3. В столбцах таблицы приведены следующие данные: в третьем – экспериментальные данные, в четвертом – значение экспериментальной погрешности ( $\delta_\Sigma$ ), с пятого по седьмой – относительные отклонения между расчетными Р и экспериментальными Э данными, в восьмом – относительное значение расчетной (статистической) погрешности ( $\delta_p$ ).

Таблица 3

#### Расчетно-экспериментальные расхождения для измерений, выполненных на сборках БФС-61

БФС	Измерение	Значение	$\delta_\Sigma, \%$	$(P/\Sigma - 1), \%$			$\delta_p, \%$
				РОСФОНД	БНАБ-РФ	БНАБ-93	
61-0	$k_{\text{эфф.}}$	1,0003	0,3	-0,3	-0,02	-0,06	0,01
61-1		1,0004	0,3	-0,5	-0,07	-0,1	0,01
61-2		1,0004	0,3	-0,6	-0,3	-0,1	0,01
61-0	$\sigma_f^{\text{U-238}}/\sigma_f^{\text{U-235}}$	0,0320	3,0	-4,7	-9,9	-1,1	1,9
	$\sigma_f^{\text{Pu-240}}/\sigma_f^{\text{Pu-239}}$	0,2575	3,0	2,8	1,2	4,1	1,1
	$\sigma_f^{\text{Pu-242}}/\sigma_f^{\text{Pu-239}}$	0,1883	3,0	0,4	-2,0	4,6	1,2
	$\sigma_f^{\text{Th-232}}/\sigma_f^{\text{U-235}}$	0,0095	3,0	-23,6	-28,9	-20,5	2,0
	$\sigma_f^{\text{Pu-239}}/\sigma_f^{\text{U-235}}$	1,0570	1,5	-1,0	-2,2	-0,7	0,8
	$\sigma_f^{\text{Pu-241}}/\sigma_f^{\text{Pu-239}}$	1,2590	3,0	2,3	2,7	1,0	0,8
	$\sigma_f^{\text{U-233}}/\sigma_f^{\text{U-235}}$	1,5130	3,0	-3,1	-3,1	-1,2	0,8
	$\sigma_f^{\text{Am-241}}/\sigma_f^{\text{Pu-239}}$	0,1963	3,0	0,1	-3,2	14,8	1,4
61-1	$\sigma_f^{\text{Pu-238}}/\sigma_f^{\text{Pu-239}}$	0,5412	3,0	12,1	14,6	17,6	0,9
61-2	$\sigma_f^{\text{Pu-239}}/\sigma_f^{\text{U-235}}$	1,0520	1,5	-1,4	-2,7	-1,0	0,8
	$\sigma_f^{\text{Np-237}}/\sigma_f^{\text{Pu-239}}$	0,2610	3,0	0,2	-1,2	2,3	0,8
$\mu_k^2$ для $k_{\text{эфф.}}$				3,09	0,39	0,11	
$\mu_k^2$ (все эксперименты)				1,13	1,30	2,28	

Как видно из данных таблицы, для большинства спектральных индексов расчетно-экспериментальные расхождения у всех библиотек лежат в пределах  $3\sigma$  экспериментальной погрешности. Исключением являются расчетно-экспериментальные расхождения для



отношения сечений деления  $^{232}\text{Th}$  к сечению деления  $^{235}\text{U}$  и отношения сечений деления  $^{238}\text{Pu}$  к сечению деления  $^{239}\text{Pu}$ , величина которых в разы превышает величину экспериментальной погрешности. Столь большие значения расхождений обусловлены техническими причинами проведения измерений сечения деления у данных изотопов. Экспериментальные данные для этих спектральных индексов были исключены из дальнейшего расчетно-экспериментального анализа.

Из данных, приведенных в табл. 3, можно сделать выводы о том, что константная погрешность, обусловленная групповым приближением (переход от библиотеки РОСФОНД к ее групповой версии БНАБ-РФ), для интегральных сечений деления не превышает 2,5%, что сопоставимо со статистической погрешностью расчетов. При этом переход от библиотеки БНАБ-93 к библиотеке БНАБ-РФ для большинства спектральных индексов не приводит к смещению результатов расчетов скоростей деления  $\langle\sigma_f\rangle$  (изменения значений  $\langle\sigma_f\rangle$  в пределах статистической погрешности расчетов), за исключением изотопов  $^{241}\text{Am}$  и  $^{243}\text{Am}$ , расхождения результатов расчетов  $\langle\sigma_f\rangle$  для которых достигают 14 – 23%. Эксперименты по измерению относительной скорости деления с использованием МКД на сборках БФС-61 не выполнялись.

В таблице 3 приведена величина интегрального показателя эффективности  $\mu_k^2$  – количественной меры эффективности описания системой констант  $k$  набора интегральных экспериментов  $N$ , которая определяется следующим соотношением [20]:

$$\mu_k^2 = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \left[ \left( (P_n^k - \mathfrak{E}_n) \cdot 100 / \mathfrak{E}_n \right)^2 / (\delta_{\mathfrak{E}_n}^2 + \delta_{P_n^k}^2) \right],$$

где  $N$  – число экспериментов;  $n$  – номер эксперимента;  $k$  – идентификатор системы констант.

По определению Л.Н. Усачева, оптимизированной системой констант, не требующей корректировки для описания набора из  $N$  экспериментальных данных, является та система констант, величина интегрального показателя эффективности  $\mu_k^2$  для которой лежит в интервале от нуля до единицы.

Как видно из результатов расчетно-экспериментального анализа (см. предпоследнюю строку табл. 3), минимальное значение  $\mu_k^2$  для  $k_{\text{эфф.}}$  наблюдается только для библиотеки БНАБ-93, поскольку планирование экспериментов на сборках БФС-61 выполнялось с использованием результатов расчетов по этой библиотеке. Но по результатам расчетно-экспериментального анализа всей совокупности измерений, выполненных на серии сборок БФС-61, оптимальной системой констант является библиотека РОСФОНД.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рассмотрены особенности подготовки взаимосогласованных расчетных моделей для прецизионных и инженерных кодов и проведения на их основе расчетов нейтронно-физических характеристик трех конфигураций критической сборки БФС-61.

Продемонстрированы улучшенные функциональные возможности актуализированного программного и константного обеспечения для расчетно-экспериментального анализа интегральных экспериментов на сборках БФС, позволяющих существенно сократить время и минимизировать вероятность возникновения ошибок при составлении моделей, создавать взаимосогласованные модели для прецизионных и инженерных кодов. Новые возможности программы CONSYST-RF позволяют значительно упростить и автоматизировать составление расчетных заданий для учета гетерогенных эффектов блокировок сечений, избежать привлечения дополнительных программ. В актуализированной версии программного комплекса ММК-РФ реализована функция накладываемой сетки, позволяющая проводить вычисления спектральных характеристик и пространственных распределений скоростей реакций, измеряемых на сборках БФС. Помимо этого с помощью ММК-РФ можно проводить расчеты в многогрупповом приближении с

детальным ходом сечений и комбинированным способом. Поскольку код ММК-РФ имеет преимущества по скорости расчета перед кодом MCNP благодаря специализированному геометрическому модулю, то он может быть отечественным прецизионным кодом расчетного сопровождения экспериментов на критических сборках БФС.

Выполнено тестирование методики подготовки групповых констант с учетом эффектов пространственной гетерогенности, реализованной в программы CONSYST-RF. Показано, что различие между групповым подходом и детальным описанием нейтронных сечений в расчетах критичности не превышает 0,3% в критичности для сборок БФС-61. Для спектральных индексов смещения результатов лежат в пределах статистической погрешности расчетов. По результатам расчетно-экспериментального анализа всей совокупности измерений, выполненных на серии сборок БФС-61, оптимальной системой констант является библиотека РОСФОНД.

### Литература

1. РБ-061-11 «Положение о проведении верификации и экспертизы программных средств по направлению «Нейтронно-физические расчеты» – М.: Федеральная служба по экологическому, технологическому и атомному надзору, 2011. – 24 с. Электронный ресурс: <https://files.stroyinf.ru/Index2/1/4293796/4293796222.htm> (дата обращения 28.04.2019).
2. MCNP – A General Monte Carlo N-Particle Transport Code, Version 5, Volume I: Overview and Theory, LA-UR-03-1987. – Los Alamos, US, 2008. – 416 p.
3. Gomin E.A., Gurevich M.I., Maierov L.V. Status of MCU. Programme and Book of Abstracts. Advanced Monte Carlo on Radiation Physics, Particle Transport Simulation and Applications, Monte Carlo 2000, October 23 – 26, 2000. – Lisbon, Portugal, 2000. – PP. 2003-2004.
4. Блыскава А.А., Мантуров Г.Н., Николаев М.Н., Цибуля А.М. Программный комплекс CONSYST/ММККЕНО для расчета ядерных реакторов методом Монте-Карло в многогрупповом приближении с индикатрисами рассеяния в Рn-приближении: Препринт ФЭИ-2887. – Обнинск: ГНЦ РФ-ФЭИ, 2001. – 28 с.
5. Жердев Г.М., Кислицина Т.С., Николаев М.Н. Система комбинированных констант РОКО-КО – Современное состояние, результаты тестирования с геометрическим модулем ММК. // Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2018. – № 2. – С. 47-57.
6. Жердев Г.М., Кислицина Т.С., Мантуров Г.Н., Николаев М.Н. Комплекс программ ММК-РФ для прецизионных расчетов нейтронных и гамма полей с константами БНАБ-РФ и РОСФОНД / Сб. тез. докл. V МНТК НИКИЭТ-2018 (2–5 октября 2018г., Москва.). – М.: Изд-во АО «НИКИЭТ», 2018. – С. 241-242.
7. Абагян Л.П., Базаянц Н.О., Бондаренко И.И., Николаев М.Н. Групповые константы для расчета ядерных реакторов. – М.: Атомиздат, 1964. – 139 с.
8. Николаев М.Н., Рязанов Б. Г., Савоськин М.М., Цибуля А.М. Многогрупповое приближение в теории переноса нейтронов. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 256 с.
9. Мантуров Г.Н., Николаев М.Н., Цибуля А.М. Программа подготовки констант CONSYST. Описание применения. Препринт ФЭИ-2828. – г. Обнинск: ГНЦ РФ-ФЭИ, 2000. – 48 с.
10. Rozhikhin Y., Semenov M. Tsiboulia A., Matveenko I., Bess J. BFS-61 Assemblies: Critical Experiments of Mixed Plutonium, Depleted Uranium, Graphite and Lead with Different Reflectors, ICSBER, NEA/NSC/DOC/(95)03/VI, September 2008 Edition.
11. Rozhikhin Y., Semenov M. Tsiboulia A., Matveenko I., Bess J. BFS-61 Assemblies: Experimental Model of Lead-Cooled Fast Reactors with Core of Metal Plutonium-Depleted Uranium Fuel and Different Reflectors. BFS1-LMFR-EXP-002, IPRhEP, NEA/NSC/DOE(2006), 2006 Edition.
12. Андрианова О.Н., Мантуров Г.Н., Рожихин Е.Ю. Применение неаналоговых методов в коде MCNP для расчетного анализа измерений скоростей реакций на критических сборках БФС. // Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2016. – № 2. – С. 66-76.
13. Андрианова О.Н., Дулин В.А., Михайлова И.В. и др. Расчетно-экспериментальный анализ скорости реакций Pu, Np, Am, Cm на критических стендах БФС. // Атомная энергия. – 2017. – Т. 122. – № 5. – С. 243-248.
14. Андрианова О.Н. Методические аспекты оценки составляющей погрешности в расче-

тах реакторных характеристик, обусловленной резонансной структурой нейтронных сечений. // ВАНТ. Серия: Ядерно-реакторные константы. – 2017. – Вып. 1. – С. 74-86.

15. Кошечев В.Н., Ломаков Г.Б., Мантуров Г.Н., Николаев М.Н., Семёнов М.Ю., Цибуля А.М. Свидетельство 2016612865 Российской Федерации. Свидетельство о гос. регистрации программы для ЭВМ. CONSYST-RF; заявитель и правообладатель АО «ГНЦ РФ-ФЭИ» (RU). – № 2016610022; заявл. 11.01.2016; опубл. 11.03.2016. Реестр программ для ЭВМ. – 1 с.

16. Мантуров Г.Н., Цибуля А.М., Николаев М.Н., Кошечев В.Н., Семёнов М.Ю. Свидетельство 2013612298 Российской Федерации. Свидетельство о гос. регистрации программы для ЭВМ. CONSYST; заявитель и правообладатель АО «ГНЦ РФ-ФЭИ» (RU). – № 2012661768; заявл. 29.12.2012; опубл. 21.02.2013. Реестр программ для ЭВМ. – 1 с.

17. РОСФОНД – РОСсийская библиотека Файлов Оцененных Нейтронных Данных. Электронный ресурс: <https://www.ippe.ru/reactors/reactor-constants-datacenter/rosfond-neutron-database> (дата обращения 28.04.2019).

18. Кошечев В.Н., Мантуров Г.Н., Николаев М.Н. и др. Библиотека групповых констант БНАБ-РФ для расчетов реакторов и защиты. // Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2014. – № 3. – С. 93-101.

19. Андрианова О.Н., Головки Ю.Е., Рожихин Е.В. и др. Верификация библиотеки констант БНАБ-РФ на модельных задачах и специально отобранных бенчмарк-экспериментах. // Ядерная физика и инжиниринг. – 2012. – Т. 3. – № 2. – С. 120.

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

Поступила в редакцию 29.04.2019 г.

#### Авторы

Андрианова Ольга Николаевна, старший научный сотрудник, канд. техн. наук

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

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

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

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

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

Мантуров Геннадий Николаевич, начальник лаборатории, д-р техн. наук

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

Теплухина Евгения Сергеевна, младший научный сотрудник

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

UDC 621.039.51.17

## CONSIDERATION OF HETEROGENEOUS EFFECTS IN PREPARING MULTIGROUP NEUTRON CONSTANTS WITH THE CONSYST/ABBN-RF SYSTEM

Andrianova O.N., Jerdev G.M., Lomakov G.B., Manturov G.N., Teplukhina E.S.

JSC «SSC RF-IPPE n.a. A.I. Leypunsky»

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

#### ABSTRACT

The need for developing mutually consistent calculation models for precision and engineering neutronic codes is defined by requirements to certification and verification of software and constants used for the neutronic calculations in accordance with the

«Provision on Verification and Review of Software in the Field of «Neutron and Physical Calculations» (RB-061-11). The key requirement in RB-061-11 is that there shall be a methodically transparent and reproducible procedure to estimate the methodological and constant components of the calculation uncertainty to be implemented only if mutually consistent calculation models are available. Using an example of a series of measurements carried out on three critical BFS-61 configurations (JSC «SSC RF-IPPE n.a. A.I. Leypunsky»), factors are discussed which need to be taken into account when developing such types of models and the peculiarities of their application for calculating the neutronic characteristics of these BFS assemblies. Improved functional capabilities of updated neutron transport software and constants for the calculation and experimental analysis of the BFS integral experiments (ROSFOND/BNAB-RF, CONSYST and MMK-RF) have been demonstrated, allowing a much shorter time and the smallest possible probability of errors in preparing mutually consistent calculation models, as well as correct estimation of the methodological and constant components of the calculation uncertainty in accordance with RB-061-11. The results of estimating the constant uncertainty caused by group approximation are presented. It has been shown based on an analysis of the obtained results that the divergence in the calculations of the BFS-61 critical assembly configurations in the transition from the ROSFOND evaluated neutron data library to its group version, BNAB-RF, does not exceed 0.3% in criticality (a heterogeneous correction term of 0.2 to 0.8%). The estimated spectral index data bias falls within the limits of the Monte Carlo statistical uncertainty. Based on results of a calculation and experimental analysis for the entire set of measurements performed based on a series of the BFS-61 critical assemblies, the ROSFOND library is the nuclear data library providing minimal discrepancies between calculated and experimental values.

**Key words:** integral experiments, BFS, effective neutron multiplication factor, uncertainty, Monte Carlo, ROSFOND, BNAB-RF, spectral indices.

#### REFERENCES

1. RB-061-11. Provision on Verification and Review of Software in the Field of «Neutron and Physical Calculations» Available at: <https://files.stroyinf.ru/Index2/1/4293796/4293796222.htm> (accessed Apr 28, 2019) (in Russian).
2. MCNP – A General Monte Carlo N-Particle Transport Code, Version 5, Volume I: Overview and Theory, LA-UR-03-1987, Los Alamos, US, 2008, 416 p.
3. Gomin E.A., Gurevich M.I., Maiorov L.V. *Status of MCU*. Programme and Book of Abstracts. Advanced Monte Carlo on Radiation Physics, Particle Transport Simulation and Applications, Monte Carlo 2000, October 23 – 26, 2000. Lisbon, Portugal, 2000, pp. 2003-2004.
4. Blyskavka A.A., Manturov G.N., Nikolaev M.N., Tsibulya A.M. *CONSYST/MMKKKENO Software Package for Calculation of Nuclear Reactors by Monte Carlo Method in Multigroup Approximation with Scattering Indicators in Pn-approach*. Preprint FEI-2887. Obninsk. GNTs RF-FEI Publ., 2001, 28 p. (in Russian).
5. Jerdev G.M., Kislitsyna T.S., Nikolaev M.N. ROCOCO System of Combined Neutron Constants – Current Status and Results of Testing Using Geometrical Module of the MMK Code. *Izvestiya vuzov. Yadernaya energetika*. 2018, no. 2, pp. 47-57 (in Russian).
6. Zherdev G.M., Kislitsina T.S., Nikolaev M.N., Manturov G.N. MMK-RF Program Complex for Precision Calculations of Neutron and Gamma Fields Using BNAB-RF and ROSFOND Constants. *Proc. of the V-th ISTC NIKIET-2018*, Moscow, 2018, pp. 241-242 (in Russian).
7. Abagyan L.P., Bazazyanc N.O., Bandarenko I.I., Nikolaev M.N. *Group Constants for Nuclear Reactors' Calculating*. Moscow. Atomizdat Publ., 1964, 139 p. (in Russian).
8. Nikolaev M.N., Ryazanov B. G., Savos'kin M.M., Tsibulya A.M. *Multigroup Approximation in Neutron Transport Theory*. Moscow. Energoatomizdat Publ., 1984, 256 p. (in Russian).
9. Manturov G.N., Nikolaev M.N., Tsibulya A.M. *CONSYST Program for Preparation of Constants*.

- Overview of Application*. Preprint FEI-2828. Obninsk. GNTs RF-FEI, 2000, 48 p. (in Russian).
10. Rozhikhin Y., Semenov M., Tsiboulia A., Matveenko I., Bess J. BFS-61 Assemblies: Critical Experiments of Mixed Plutonium, Depleted Uranium, Graphite and Lead with Different Reflectors, ICSBEP, NEA/NSC/DOC/(95)03/VI, September 2008 Edition.
  11. Rozhikhin Y., Semenov M., Tsiboulia A., Matveenko I., Bess J. BFS-61 Assemblies: Experimental Model of Lead-Cooled Fast Reactors with Core of Metal Plutonium-Depleted Uranium Fuel and Different Reflectors. BFS1-LMFR-EXP-002, IPRhEP, NEA/NSC/DOE(2006), 2006 Edition.
  12. Andrianova O., Manturov G., Rozhikhin Yu. Application of MCNP nonanalog techniques for calculations of reaction rate measurements at the BFS facilities. *Izvestiya vuzov. Yadernaya energetika*. 2016, no. 2, pp. 66-76 (in Russian).
  13. Andrianova O.N., Dulin V.A., Mihajlova I.V., Andrianov A.A. Computational and Experimental Analysis of Pu, Np, Am, Cm Reaction Rates on BFS Critical Benches. *Atomnaya Energiya*. 2017, v. 122, no. 5, pp. 291-298 (in Russian).
  14. Andrianova O.N. Methodological Aspects of Evaluating Uncertainties in Reactor Characteristics Due to the Resonance Structure of Nuclear Cross Sections. *VANT. Ser. Yadernye i Reaktornye Konstanty*. 2017, iss. 1, pp. 74-86 (in Russian).
  15. Koshcheev V.N., Lomakov G.B., Manturov G.N., Nikolaev M.N., Semenov M.Yu., Tsibulya A.M. Certificate of the Russian Federation 2016612865. *Certificate of State Registration of CONSYST-RF Program for Computer*. Applicant and copyright holder: JSC «SSC RF-IPPE» (RU). – No. 2016610022; App. Jan. 11, 2016; Publ. Mar. 11, 2016. Registry of computer programs. 1 p. (in Russian).
  16. Manturov G.N., Tsibulya A.M., Nikolaev M.N., Koshcheev V.N., Semenov M.Yu. Certificate of the Russian Federation 2013612298. *Certificate of State Registration of CONSYST Program for Computer*. Applicant and copyright holder: JSC «SSC RF-IPPE» (RU). – No. 2012661768; App. Dec. 29, 12.2012; Publ. Feb. 21, 2013. Registry of computer programs. – 1 p. (in Russian).
  17. ROSFOND – Russian Library of Evaluated Nuclear Data Files. Available at: <https://www.ippe.ru/reactors/reactor-constants-datacenter/rosfond-neutron-database> (accessed Apr 27, 2019) (in Russian).
  18. Koscheev V.N., Manturov G.N., Nikolaev M.N., Tsiboulya A.M. ABBN-RF Group Constants Library for Nuclear Reactor and Shielding Calculations. *Izvestia Vysshikh Uchebnykh Zawedeniy. Yadernaya Energetika*. 2014, no. 3, pp. 93-101 (in Russian).
  19. Andrianova O.N., Golovko Yu.E., Rozhikhin E.V., Yakunin A.A. Verification of the ABBN-RF Neutron Constant Library Using Sample Tasks and Specially Selected Benchmark Experiments. *Yadernaya Fizika i Inzhiniring*. 2012, v. 3, no. 2, pp. 120-126 (in Russian).
  20. Usachev L.N., Bobkov Yu.G. Sequential Planning of Integrated Experiments and Effective Method of Fitting Constants, taking into Account the Correction of Errors in the Totality of Microscopic Measurements. *Collection «Yadernye konstanty»*. Moscow. Atomizdat Publ., 1972, iss. 10, 88 p. (in Russian).

## Authors

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

E-mail: oandrianova@ippe.ru

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

E-mail: jerdev@ippe.ru

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

E-mail: glomakov@ippe.ru

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

E-mail: mant@ippe.ru

Teplukhina Eugenia Sergeevna, Junior Researcher

E-mail: eteplukhina@ippe.ru