

ПРЕЦИЗИОННЫЕ РАСЧЕТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ ПО ПРОХОЖДЕНИЮ НЕЙТРОНОВ ЧЕРЕЗ СЛОИ ОТРАЖАТЕЛЯ НА СТЕНДАХ БФС ДЛЯ ПОПОЛНЕНИЯ ВЕРИФИКАЦИОННОЙ БАЗЫ ОБОСНОВАНИЯ РУ СО СВИНЦОВЫМ ТЕПЛОНОСИТЕЛЕМ

Г.М. Жердев*, **О.Н. Андрианова***, **Е.С. Теплухина***, **Ж.В. Боровская****,
А.П. Жирнов**

* АО «ГНЦ РФ-ФЭИ им. А.И. Лейпунского»,
249033, Калужская обл., г. Обнинск, пл. Бондаренко, 1

** АО «НИКИЭТ»
107140, Москва, ул. М. Красносельская, д. 2/8



Представлены результаты работ, связанных с пополнением верификационной базы и оценки расчетной погрешности определения энерговыделения в стальном отражателе реакторной установки (РУ) со свинцовым теплоносителем на основе выполненных в разные годы экспериментов на критических сборках БФС посредством анализа и пересмотра проведенных ранее расчетно-экспериментальных исследований по прохождению нейтронов через слои стального отражателя. В рассмотрение включены эксперименты на стенде БФС-66 по моделированию потоков нейтронов и фотонов в защитных композициях РУ, а также эксперименты на стендах БФС-64 и БФС-80-2 по моделированию прохождения нейтронов и гамма-квантов через слои отражателей РУ из различных материалов. Информация, представленная в выпущенных ранее материалах по описанию указанных экспериментов, проанализирована и дополнена соответствующими данными, необходимыми для составления детальных расчетных моделей для прецизионных нейтронно-физических кодов. На основании актуализированных и уточненных данных созданы детальные прецизионные расчетные модели с подробным описанием гетерогенной структуры БФС и экспериментальных устройств и выполнены расчеты, подтверждающие их работоспособность. Расчеты выполнены с использованием кодов на основе методов Монте-Карло (MCU-BR, MCNP, ММК-РФ, ММК-РОКОКО) с константами БНАБ-РФ, MDBBR50 и файлами РОСФОНД основных нейтронно-физических характеристик, измеряемых на сборках БФС-66, -64, -80-2. Разработанные расчетные модели рассмотренных нейтронно-физических экспериментов могут быть использованы для обоснования проектов реакторов на быстрых нейтронах со свинцовым теплоносителем, верификации расчетных кодов и констант, обоснования константной составляющей погрешности характеристик реакторных установок.

Ключевые слова: интегральные эксперименты, БФС, прецизионные модели, БНАБ-РФ, РОСФОНД, МСУ-ВР, ММК-РФ, ММК-РОКОКО.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время во всем мире распространена практика активного использования результатов интегральных и реакторных экспериментов на критических стендах нулевой мощности для обоснования проектов реакторных установок (РУ) различных типов, оценки и повышения точности расчетных предсказаний характеристик проектируемых реакторных и вне реакторных систем [1 – 3]. Качественно выполненные и оцененные эксперименты составляют основу справочников и баз рекомендованных оцененных экспериментальных нейтронно-физических данных, которые широко используются для планирования новых экспериментов, оценки эффективности и информативности новых экспериментальных программ, верификации и аттестации нейтронно-физических констант и кодов [4] и пр.

Корректно выполненные эксперименты могут приобрести статус бенчмарк-эксперимента, под которым понимают эксперимент реперного класса с минимальными оцененными погрешностями. Соответствующая бенчмарк-модель эксперимента, созданная на основе бенчмарк-эксперимента, представляет собой наиболее эффективный способ фиксации, сохранения и передачи информации и данных о нейтронно-физическом эксперименте, необходимых для задач по верификации и аттестации расчетных кодов и констант, корректировки и уточнения нейтронно-физических данных, повышения точности расчетных методик и алгоритмов, оценки точности предсказания и определения целевых точностей нейтронно-физических характеристик проектируемых РУ, обоснования конкретных технических решений.

В период с 1990 по 2013 гг. в ФЭИ на физических стендах БФС-1 и БФС-2 было выполнено семь серий экспериментальных программ на критических конфигурациях со свинцом в активной зоне или отражателе БФС-61, -64, -77, -85, -87, -95 и -113, предназначенных для изучения нейтронно-физических характеристик активных зон быстрых реакторов со свинцовым теплоносителем. Расчетно-экспериментальный анализ данных экспериментов в разные годы был выполнен в АО «ГНЦ РФ-ФЭИ» для АО «НИКИЭТ», НИЦ «КИ», АО «ОКБМ Африкантов», ОКБ «ГИДРОПРЕСС», МНТЦ, NEA/OECD [5].

В период 2017 – 2019 гг. в рамках ПН «ПРОРЫВ» была инициирована работа по созданию отраслевой системы рекомендованных нейтронно-физических экспериментальных данных для обоснования реакторных установок на быстрых нейтронах со свинцовым теплоносителем. Основа этой отраслевой системы – экспериментальная информация по исследованиям на физических стендах БФС, которые были выполнены в разные годы в ФЭИ, в обоснование проектов быстрых реакторов с натриевым и свинцовым теплоносителем. В базу данных включены оценки экспериментов на сборках БФС-61, -64, -77, -85, -87, -95 и -113.

С целью пополнения верификационной базы для оценки расчетной погрешности определения энерговыделения в стальном отражателе РУ со свинцовым теплоносителем был осуществлен анализ и пересмотр проведенных ранее расчетно-экспериментальных исследований по прохождению нейтронов через слои стального отражателя, выполненных на сборках БФС-66, -64, -80 и не вошедших в ранее упомянутую базу оцененных экспериментов ПН «ПРОРЫВ».

КРАТКАЯ ИНФОРМАЦИЯ ОБ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ПРОГРАММАХ НА СТЕНДАХ БФС

В рассмотрении включены эксперименты на стенде БФС-66 по моделированию потоков нейтронов и фотонов в защитных композициях РУ, а также эксперименты на стен-

дах БФС-64 и БФС-80-2 по моделированию прохождения нейтронов и гамма-квантов через слои отражателей РУ из различных материалов.

Таблица 1

Краткая характеристика программы измерений на сборках БФС-66, -64 и -80

Сборка		Материалы	Назначение	Измерения
БФС-64	Базовая	ТЯ: Pu (95%), UO ₂ (обедн.) и графит; ТН: Pb; БЭ: PbBi	Секторная модель БРЕСТ с имитацией НТ	$k_{эф}$, спектр нейтронов и γ -квантов
	Без МАЗ			$k_{эф}$, $H(^{239}\text{Pu})$ АЗ и БЭ, $R(^{239}\text{Pu})$
	МАЗ-1			$k_{эф}$, $H(^{239}\text{Pu}$ и $^{238}\text{U})$ АЗ и БЭ, $R(^{239}\text{Pu})$
	МАЗ-2			$k_{эф}$, $H(^{238}\text{U})$ БЭ
БФС-66	66-1 базовая	ТЯ: Pu (95%), UO ₂ (обедн.); ТО: UO ₂ +Na	Моделирование АЗ БН-600 с полной загрузкой МОКС-топлива	$k_{эф}$, $H(^{239}\text{Pu}$, ^{235}U и $^{238}\text{U})$, $R(^{239}\text{Pu}$, ^{235}U и $^{238}\text{U})$
	66-Б1	-//--, вставка с имитацией НТ; ТО: UO ₂ +Na	Моделирование АЗ БН-800 с НТ	$k_{эф}$, $H(^{239}\text{Pu}$, ^{235}U и $^{238}\text{U})$
	66-Б2	-//--, ТО: UO ₂		
	66-Б3	-//--, ТО: U(d)		
	66-Б4	-//--, ТО: сталь X18		
	66-Б5	-//--, ТО: Cr		
	66-Б6	-//--, ТО: Ni		
	66-Б7	-//--, ТО: Zr		
	66-Б8	-//--, ТО: Fe		
66-Б9	-//--, ТО: сталь X28			
БФС-80	80-1	ТЯ: U (36%), UO ₂ (обедн.); ТН: PbBi; БЭ: PbBi; ТО: Pb	Быстрый реактор со свинцово- висмутовым теплоносителем	$k_{эф}$, $H(^{235}\text{U}$ и $^{238}\text{U})$ АЗ и БЭ, $R(^{235}\text{U}$ и $^{238}\text{U})$
	80-2			$k_{эф}$, спектр нейтронов и γ -квантов, $H(^{235}\text{U}$ и $^{238}\text{U})$ АЗ и БЭ, $R(^{235}\text{U}$ и $^{238}\text{U})$
МАЗ – макет аварийной защиты; ТЯ – топливная ячейка; ТН – теплоноситель; ТО – торцевой отражатель; НТ – нитридное топливо; АЗ – активная зона; БЭ – боковой экран; $H(^{239}\text{Pu}$, ^{235}U и $^{238}\text{U})$ и $R(^{239}\text{Pu}$, ^{235}U и $^{238}\text{U})$ – аксиальные и радиальные распределения ^{239}Pu , ^{235}U и ^{238}U соответственно				

Серия критическихборок БФС-64 представляет собой секторную модель активной зоны быстрого реактора с оксидным уран-плутониевым топливом и свинцовым теплоносителем и является модификацией сборки БФС-62 [2]. Экспериментальная программа была нацелена на исследование свойств периферии активной зоны и отражателя, определение возмущения поля энерговыделения присущими реактору неоднородностями – органами СУЗ. Также были выполнены измерения спектра нейтронов и гамма-квантов методом протонов отдачи. Измерены распределения относительной скорости деления изотопов ^{239}Pu и ^{238}U а) по высоте органов СУЗ, расположенных на периферии активной зоны, б) по радиусу активной зоны в центральной плоскости и в плоскости, проходящей через органы СУЗ.

Сборка БФС-66-1, следующая модификация сборки БФС-62, – модель активной зоны реактора БН-600 с МОКС-топливом. Сборка серии БФС-66-Б – модель активной зоны реактора БН-800 с нитридным топливом. Сборка БФС-66-Б имеет девять различных

критических конфигураций БФС-66-Б1 – Б9, отличающихся друг от друга композицией аксиального отражателя (три конфигурации с различными урановыми отражателями, три с отражателями из стали различного состава, также отражатели из хрома, никеля и циркония).

На сборках измерялись аксиальные распределения скоростей деления ^{239}Pu , ^{235}U и ^{238}U в межтрубном зазоре рядом с центральным каналом. Цель программы измерений – изучение нейтронных полей в невоспроизводящих экранах быстрых реакторов.

Две модификации сборки БФС-80-1 и -2 – модели активной зоны быстрого реактора со свинцово-висмутовым теплоносителем на начало и конец компании соответственно. На сборках измерялись радиальные и аксиальные распределения скоростей деления ^{235}U и ^{238}U и спектры нейтронов методом протонов отдачи.

В таблице 1 представлена краткая информация о программах измерений, выполнявшихся на сборках БФС-66, -64 и -80, и приведены характеристики компоновок активных зон.

В рамках детального рассмотрения выполненных ранее работ по анализу экспериментов на сборках БФС-66, -64 и -80 было выявлено то, что расчетное моделирование в большинстве случаев выполнялось с использованием гомогенных моделей с введением расчетных поправок в экспериментальные величины для приведения экспериментальных данных к расчетной модели с целью снижения расчетно-экспериментальных расхождений, часть экспериментальных значений измерений пространственных распределений скоростей деления делящихся изотопов исключалась из анализа; указанные обстоятельства в совокупности приводили к утере и искажению экспериментальной информации.

Информация, представленная в выпущенных ранее материалах по описанию указанных экспериментов, проанализирована и дополнена соответствующими данными, необходимыми для составления детальных расчетных моделей для прецизионных нейтронно-физических кодов. Все экспериментальные и расчетные (на основе уточненных моделей) данные по нейтронно-физическим экспериментам на БФС-66, -64 и -80 представлены в соответствии с требованиями и форматом регламента оценки и экспертизы нейтронно-физических экспериментов. Опыт использования данного документа продемонстрировал его в части способствования повышению качества представления экспериментальных и расчетных данных (прежде всего – обеспечение возможности создать на основе представленного описания адекватную расчетную модель измерений, что было невозможно ранее, основываясь только на данных из первичных источников), а также степени отчуждаемости оценки экспериментов.

РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ

В условиях сильной гетерогенности активных зон критическихборок возникает необходимость применения кодов, позволяющих воспроизводить точное описание геометрии и детальное представление энергетической зависимости характеристик нейтронных взаимодействий. Это позволяют делать коды, основанные на методе Монте-Карло.

На основании актуализированных и уточненных данных по сборкам БФС-66, -64 и -80 созданы детальные прецизионные расчетные модели с описанием гетерогенной структуры БФС и экспериментальных устройств для кодов на основе метода Монте-Карло МСУ-ВР, МСНР, ММК-РФ, ММК-РОКОКО [6 – 8] с константами БНАБ-РФ, MDBBR50 и файлами РОСФОНД [9], позволяющими рассчитать основные нейтронно-физические характеристики, измеряемые на сборках БФС-66, -64 и -80, важные с точки зрения оценки расчетной погрешности определения энерговыделения в стальном отражателе реакторной установки со свинцовым теплоносителем.

Для всех рассмотренных критических конфигурацийборок были посчитаны $k_{эф}$ по системам констант РОСФОНД и БНАБ-РФ (табл. 2). Различие результатов расчетов $k_{эф}$, выполненных на основе группового приближения (БНАБ-РФ), с результатами расчетов,

проводимых по РОСФОНД, не превышает 0,2%; расхождение между расчетами и экспериментом не превышает $\Delta k/k$ и лежит в пределах экспериментальной погрешности.

Таблица 2

Расчетные и экспериментальные значения критичности сборок БФС-64, -66 и -80

Конфигурация	$k_{эф}^{\ominus}$ – эксп.	$k_{эф}^{P_1}$ – расч.	$k_{эф}^{P_2}$ – расч.	$k_{эф}^{P_3}$ – расч.
Число групп	–	Дет. ход	2224	1324
БФС-64-1 базовое	1,00114(280)	0,99824(12)	1,00092(12)	0,99815(13)
БФС-64-1 (Рв)	1,00067(280)	0,99768(10)	1,00020(13)	0,99729(12)
БФС-64-1 (МАЗ-1)	1,00046(280)	0,99807(11)	1,00011(12)	0,99714(13)
БФС-64-1 (МАЗ-2)	1,00076(280)	0,99815(10)	1,00040(12)	0,99724(12)
БФС-66-1	1,00070(300)	0,99878(10)	0,99974(12)	0,99899(12)
БФС-66-Б1	1,00052(300)	0,99548(10)	0,99860(12)	0,99844(12)
БФС-66-Б2	1,00088(300)	0,99698(10)	0,99885(13)	0,99991(11)
БФС-66-Б3	1,00070(300)	0,99591(11)	0,99805(12)	0,99793(12)
БФС-66-Б4	1,00058(300)	0,99674(10)	0,99955(12)	0,99939(12)
БФС-66-Б5	1,00033(300)	0,99627(11)	0,99920(12)	0,99994(12)
БФС-66-Б6	1,00076(300)	0,99548(10)	0,99858(12)	0,99814(12)
БФС-66-Б7	1,00053(300)	0,99652(10)	0,99903(13)	0,99972(13)
БФС-66-Б8	1,00060(300)	0,99562(10)	0,99817(12)	0,99832(12)
БФС-66-Б9	1,00042(300)	0,99605(10)	0,99850(12)	0,99922(13)
БФС-80-2	1,00045(450)	1,00502(12)	1,005975(12)	0,99974(12)
k^{P_1} – расчет по коду ММК-РФ с библиотекой РОСФОНД; k^{P_2} – расчет по коду ММК-РФ с использованием CONSYST-RF с библиотекой БНАБ-РФ; k^{P_3} – расчет по коду ММК-РФ с использованием CONSYST-RF с библиотекой БНАБ-93.				

Приведём примеры расчетов относительных распределений скоростей деления по высоте и радиусу сборок БФС, выполненных по коду ММК-РФ (ММК-РОКОКО) с константами РОСФОНД и БНАБ-РФ. Все измерения аксиальных и радиальных распределений были выполнены при помощи малогабаритных камер деления, которые при помощи манипулятора устанавливались в межтрубное пространство в различных положениях по высоте и радиусу активной зоны и отражателей.

На рисунке 1 показаны результаты измерений и расчетов поля энерговыделения (распределения скорости деления ^{235}U), отражающие неравномерности расположения материалов в активной зоне БФС-64-1: на рис.1а – случай однородного расположения материалов, на рис.1б – с макетами органов аварийной защиты (МАЗ).

На рисунке 2 изображены расчетные и экспериментальные данные для аксиальных распределений ^{235}U (рис. 2а) и ^{238}U (рис. 2б), измеренные в различных каналах (межтрубных зазорах) сборки БФС-80-2. На рисунке 2б показаны перепады экспериментальных и расчетных значений в скорости деления ^{238}U . Данный ход пороговой реакции обусловлен ячеечной структурой сборок БФС, активные зоны которых представляют собой чередование топливных таблеток, таблеток теплоносителя и пр.

Абсолютные погрешности измерений скоростей деления составляют для изотопов ^{235}U и ^{239}Pu около 1,5 – 2% в активной зоне с возрастанием до 3 – 4% в экранах и отражателях; для ^{238}U около 2 – 3% в активной зоне и 5 – 7% в экранах и отражателях.

Статистическая погрешность расчета скоростей деления ^{235}U , ^{238}U и ^{239}Pu не превышает погрешности измерений.

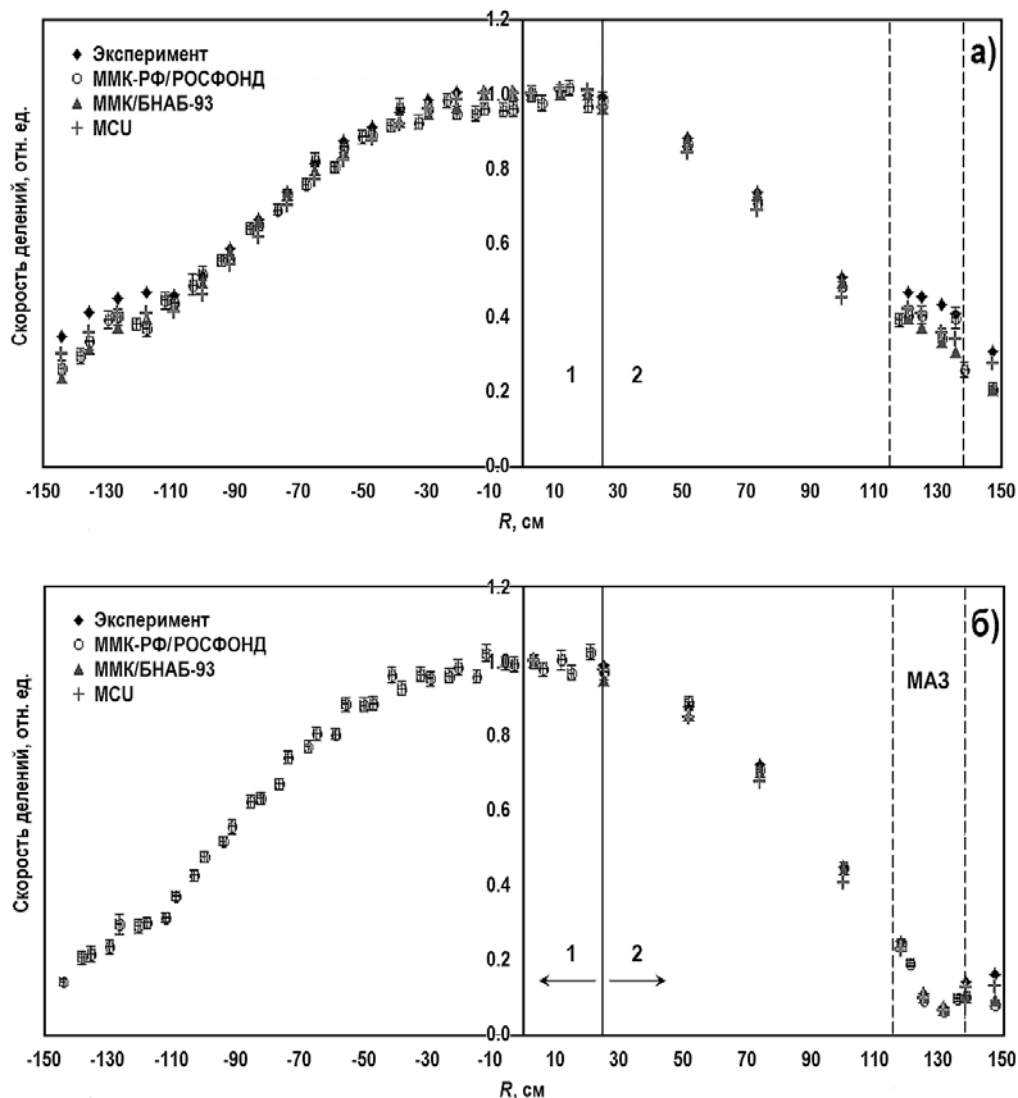


Рис. 1. Расчетные и экспериментальные радиальные распределения относительной скорости деления ^{235}U по АЗ БФС-64-1: а) – без макетов органов аварийной защиты (МАЗ); б) – с МАЗ в АЗ; 1 – радиальное направление в центральной плоскости; 2 – радиальное направление через МАЗ

АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ РАСЧЕТОВ

В ходе анализа расчетов относительных скоростей деления аксиальных и радиальных распределений, измеренных урановыми и плутониевыми камерами деления, помещаемыми напротив слоев различных материалов в активной зоне, в боковых и торцевых экранах, были оценены следующие средние по всем измерениям расчетно-экспериментальные расхождения:

- в активной зоне независимо от топливной композиции (МОКС-, урановое или нитридное уран-плутониевое топливо) расчетно-экспериментальные расхождения лежат в пределах экспериментальных погрешностей и не превышают 3%;
- в стальных отражателях, составленных из стали марки Х18, расчетно-эксперимен-

тальные расхождения не превышают 5%, а для стали марки X28 лежат в пределах 5 – 10%, что соответствует погрешности измерений;

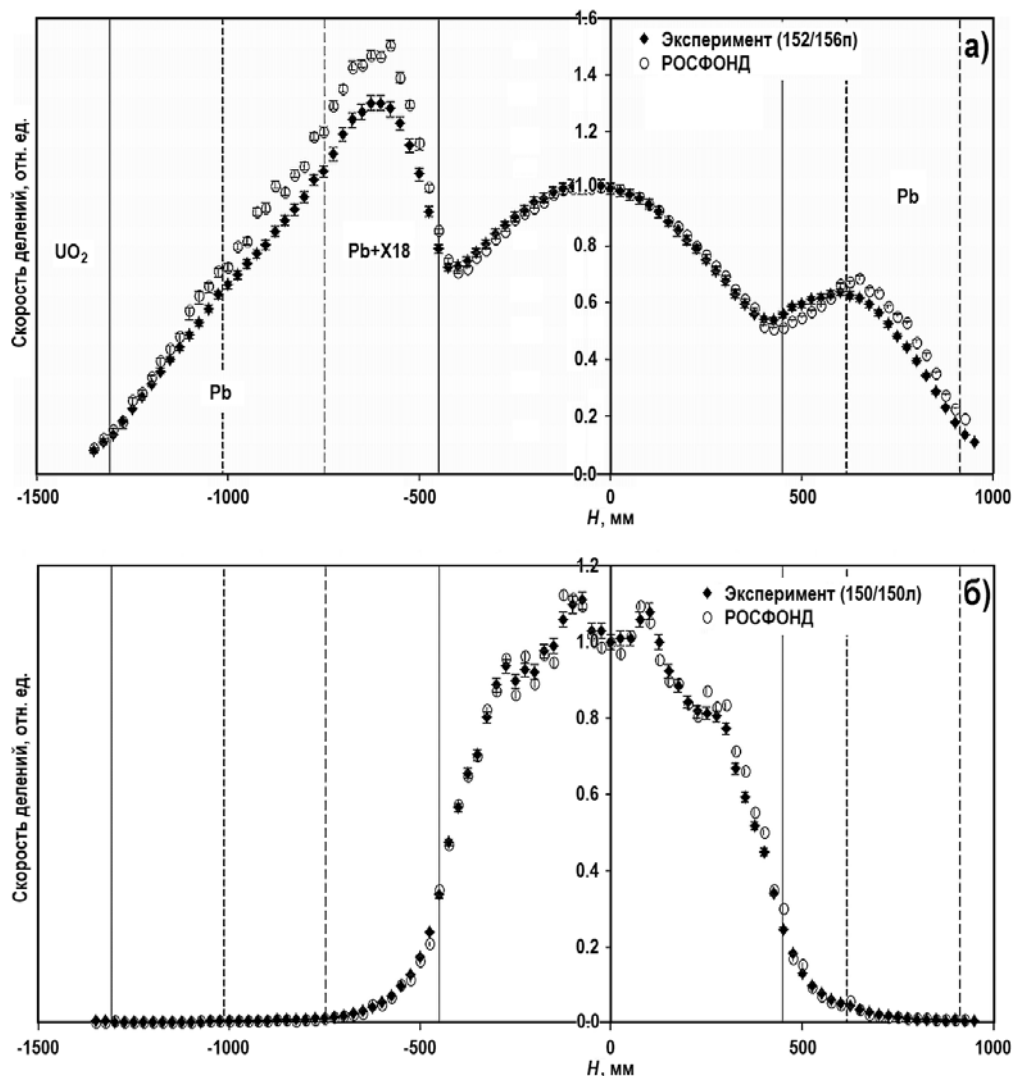


Рис. 2. Расчетные и экспериментальные аксиальные распределения относительной скорости деления по АЗ БФС-80-2: а) – ^{235}U ; б) – ^{238}U

- в отражателе из хрома расчетно-экспериментальные расхождения достигают 15%, при этом расчетные значения ниже экспериментальных данных;
- в стальном отражателе с большим содержанием железа расчетные значения в среднем на 20% выше экспериментальных данных;
- расчетные значения скоростей деления ^{235}U и ^{239}Pu в отражателе из никеля лежат в пределах 5 – 10% выше экспериментальных данных, что не превышает погрешности измерений;
- в свинцовых торцевом и боковом экранах расчетные значения скоростей деления ^{235}U и ^{239}Pu в среднем на 15%, а максимально до 25% выше экспериментальных данных.

Расчетно-экспериментальные расхождения распределений скоростей реакций деления ^{235}U и ^{239}Pu в стальном боковом экране быстрого реактора, лежащие на уровне 20 – 25%, отмечались ранее в [10 – 12]. Полученные в работе результаты не противоречат

ранее оцененным в [13] точностям расчета распределения поля энерговыделения в стальном экране. Однако анализ экспериментов серии БФС-66-Б показал, что снижение расчетно-экспериментальных расхождений до уровня погрешности измерений для сталей марки X18 и X28 может быть обусловлено перекомпенсацией ошибок в определении сечений изотопов Fe, Cr и Ni. Дальнейшее выявление причин наблюдаемых расчетно-экспериментальных расхождений в стальных и свинцовых отражателях требует проведения специализированного расчетного анализа с привлечением методологии анализа на чувствительность и оценкой константной составляющей расчета. Такие исследования позволят выполнить корректировку нейтронных данных для изотопов Fe, Cr, Ni и Pb на основании расчетного анализа рассмотренных экспериментов и подготовить проблемно-ориентированную библиотеку нейтронных данных для быстрых реакторов со свинцовым теплоносителем.

Проведенный расчетный анализ продемонстрировал высокую информативность ранее выполненных экспериментов на сборках БФС-66, -64 и -80. Это позволяет заключить, что данные разработанные расчетные модели могут быть использованы при верификации расчетных кодов и формирования библиотеки проблемно-ориентированных констант для обоснования константной составляющей погрешности и повышения точности расчетов характеристик реакторных установок и дают возможность представлять эксперименты в качестве бенчмарк-моделей.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате выполненных работ по анализу и пересмотру проведенных ранее расчетно-экспериментальных исследований по прохождению нейтронов через слои стального отражателя на сборках БФС-66, -64 и -80 осуществлено пополнение верификационной базы для оценки расчетной погрешности определения энерговыделения в стальном отражателе быстрых реакторов со свинцовым теплоносителем. Выполненный расчетный анализ является отправной точкой для проведения дальнейших расчетно-экспериментальных исследований по обоснованию и повышению надёжности расчета реакторных характеристик перспективных установок на быстрых нейтронах со свинцовым теплоносителем. Рассмотренные эксперименты могут быть представлены в качестве бенчмарк-моделей для задач формирования специализированных матриц верификации кодов под задачи оценки расчетной погрешности определения энерговыделения в стальном отражателе РУ со свинцовым теплоносителем.

Литература

1. DICE – Database for the International Criticality Safety Benchmark Evaluation Project. Электронный ресурс: <https://www.oecd-nea.org/science/wpncs/icsbep/dice.html> (дата доступа 06.04.2020).
2. ICSBEP – International Handbook of Evaluated Criticality Safety Benchmark Experiments, NEA/NSC/DOC(95). Электронный ресурс: <https://www.oecd-nea.org/science/wpncs/icsbep/handbook.html> (дата доступа 06.04.2020).
3. IRPhEP – International Reactor Physics Experiments Evaluation Project. Электронный ресурс: <https://www.oecd-nea.org/science/wprs/irphe/> (дата доступа 06.04.2020).
4. РБ-061-11 Положение о проведении верификации и экспертизы программных средств по направлению «Нейтронно-физические расчеты». Электронный ресурс: <https://files.stroyinf.ru/Index2/1/4293796/4293796222.htm> (дата доступа 06.04.2020).
5. *Dulin V., Matveenko I., Rozhikhin E. et al.* An Overview of the Experiments Performed at the BFS Facilities and Evaluated for the International Reactor Physics Experiment Evaluation Project. // Nucl. Sci. and Eng. – 2014. – Vol. 178. – No. 3.
6. *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.

7. 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.

8. Жердев Г.М., Кислицина Т.С., Николаев М.Н. Система комбинированных констант РО-КОКО – современное состояние, результаты тестирования с геометрическим модулем ММК. // Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2018. – № 2. – С. 47-57; DOI: <https://doi.org/10.26583/npe.2018.2.05>.

9. Андрианова О.Н., Головки Ю.Е., Мантуров Г.Н. Верификация константного обеспечения РОСФОНД/БНАБ-РФ в расчетах международного теста OECD/NEA по критической безопасности систем с МОКС-топливом. // Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2018. – № 3. – С. 160-170; DOI: <https://doi.org/10.26583/npe.2018.3.09>.

10. Митенкова Е.Ф., Новиков Н.В. Особенности нейтронно-физических расчетов быстрых реакторов с натриевым теплоносителем и смешанным оксидным топливом. // Атомная энергия. – 2010. – Т. 109. – Вып. 5. – С. 253-262.

11. Данилычев А.В., Коробейникова Л.В., Серегин А.С. и др. Международная оценка коэффициентов реактивности материалов в тестовой модели МАГАТЭ (гибридная активная зона реактора БН-600). // ВАНТ. Сер. Ядерные константы. – 2002. – Т. 1-2. – С. 89-108.

12. Кочетков А.Л., Матвеев И.П., Семенов М.Ю., Хомяков Ю.С. и др. Критические эксперименты на стенде БФС-2 в поддержку размещения МОКС-топлива в реакторы БН. // Известия высших учебных заведений. Ядерная энергетика. – 2007. – № 2. – С. 16-27.

13. Блыскавка А.А., Моисеев А.В., Семенов М.Ю. и др. Анализ точности расчета распределения поля энерговыделения в БН-600. // Атомная энергия. – 2010. – Т. 108. – Вып. 2. – С. 63-70.

14. Mitenkova E.F., Novikov N.V. The calculated neutronic characteristics against reconstructed ones at (U-Pu) experiments. // Proc. of the PHYTRA2, Fez, Morocco, September 26-28. – 2011. – Paper 056.

Поступила в редакцию 10.04.2020 г.

Авторы

Жердев Геннадий Михайлович, ведущий научный сотрудник, канд. физ.-мат. наук
E-mail: jerdev@ippe.ru

Андрианова Ольга Николаевна, старший научный сотрудник, канд. техн. наук
E-mail: oandrianova@ippe.ru

Боровская Жанна Владимировна, младший научный сотрудник
E-mail: borovskaya@nikiet.ru

Жирнов Андрей Павлович, заместитель начальника отдела
E-mail: zhirnov@nikiet.ru

Теплухина Евгения Сергеевна, младший научный сотрудник
E-mail: etepulkhina@ippe.ru

**CALCULATION ANALYSIS OF EXPERIMENTS ON PASSING
NEUTRONS THROUGH THE REFLECTOR LAYERS AT THE BFSs
CRITICAL ASSEMBLIES FOR COMPLEMENTING THE LEAD-COOLED
FAST REACTOR VERIFICATION DATABASE**

Zherdev G.M.*, Andrianova O.N.*, Borovskaya J.V.**, Zhirnov A.P.**,
Teplukhina E.S.*

JSC «SSC RF-IPPE n.a. A.I. Leypunsky»

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

**JSC «NIKIET»

2/8 Malaya Krasnoselskaya Str., 107140 Moscow, Russia

ABSTRACT

The article presents the results of efforts on complementing the lead-cooled fast reactor verification database by analyzing and revising previously performed calculation and experimental studies on passing neutrons through the layers of the steel reflector carried out in different years on the IPPE BFS critical facilities. In particular, the considered data can be used for the assessment of uncertainties in the energy release in the lead-cooled fast reactor steel reflector. It was analyzed that experiments at the BFS-66 assembly on modeling neutron and photon fluxes in fast reactor shielding compositions, as well as experiments at the BFS-64 and BFS-80-2 assemblies on modeling the neutrons and gamma rays transport through the layers from various materials of fast reactor reflectors. The information and data presented in previously published materials describing these experiments has been analyzed and supplemented with relevant data necessary for the preparation of detailed calculation models for precision neutronic codes. Based on the updated and refined data, detailed, precise neutronic calculation models with a detailed specification of the heterogeneous structure of the BFS facilities and experimental devices have been developed and calculations have been carried out confirming their operability. The calculations were performed using Monte Carlo neutronic codes (MCU-BR, MCNP, MMK-RF, MMK-ROCOCO) with the BNAB-RF, MDBBR50 and ROSFOND nuclear data libraries of the main neutronic characteristics measured at the BFS-66, -64, -80-2 critical assemblies. The developed calculation models of the considered integral experiments can be used to justify the designs of lead-cooled fast neutron reactors, to verify the neutronic codes and nuclear data, to evaluate uncertainties in reactor characteristics associated with nuclear data.

Key words: integral experiments, BFS, Monte Carlo codes, ROSFOND, ABBN, MCU-BR, MMK-RF, MMK-ROCOCO.

REFERENCES

1. DICE – Database for the International Criticality Safety Benchmark Evaluation Project. Available at: <https://www.oecd-nea.org/science/wpncs/icsbep/dice.html> (accessed Apr 06, 2020).
2. ICSBEP – International Handbook of Evaluated Criticality Safety Benchmark Experiments, NEA/NSC/DOC(95). Available at: <https://www.oecd-nea.org/science/wpncs/icsbep/handbook.html> (accessed Apr 06, 2020).
3. IRPhEP – International Reactor Physics Experiments Evaluation Project. Available at: <https://www.oecd-nea.org/science/wprs/irphe/> (accessed Apr 06, 2020).
4. 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 06, 2020) (in Russian).

5. Dulin V., Matveenko I., Rozhikhin E., Tsiboulia A.M. An Overview of the Experiments Performed at the BFS Facilities and Evaluated for the International Reactor Physics Experiment Evaluation Project. *Nucl. Sci. and Eng.*, 2014, v. 178, no. 3.

6. 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.

7. 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).

8. 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; DOI: <https://doi.org/10.26583/npe.2018.2.05> (in Russian).

9. Andrianova O., Golovko Ye., Manturov G. Verification of the ROSFOND/ABBN Nuclear Data Based on the OECD/NEA Benchmark on Criticality Safety of MOX-Fueled Systems. *Izvestiya vuzov. Yadernaya Energetika*. 2018, no. 3, pp. 160-170; DOI: <https://doi.org/10.26583/npe.2018.3.09> (in Russian).

10. Mitenkova E.F., Novikov N.V. Particulars of Neutron-Physical Calculations of Sodium-Cooled Fast Reactors with Mixed Oxide Fuel. *Atomnaya Energiya*. 2011, v. 109, iss. 5, pp. 309-320 (in Russian).

11. Danilychev A.V., Korobeynikova L.V., Seregin A.S., Stogov V.Yu., Chernyy V.A. International Analysis of Reactivity Coefficients for IAEA Benchmark Model (Hybrid Core of BN-600 Reactor). *VANT. Ser. Yadernye Konstanty*. 2002, v. 1-2, pp. 89-108 (in Russian).

12. Kochetkov A.L., Matveenko I.P., Semenov M.Ju., Khomiakov Yu.S., Tsiboulia A.M. Critical Experiments on BFS-2 Facility within Maintenance of Placement MOX-Fuel in Reactors BN. *Izvestia Vysshikh Uchebnykh Zawedeniy. Yadernaya Energetika*. 2007, no. 2, pp. 16-27 (in Russian).

13. Blyskavka A.A., Moiseev A.V., Semenov M.Yu., Seregin A.S., Khomyakov Yu.S., Tsibulya A.M., Belov A.A., Seleznev E.F., Vasil'ev B.A., Farakshin M.R. Accuracy Analysis of BN-600 Power Density Calculations. *Atomnaya Energiya*. 2010, v. 108, iss. 2, pp. 1-6 (in Russian).

14. Mitenkova E.F., Novikov N.V. The Calculated Neutronic Characteristics Against Reconstructed Ones at (U-Pu) Experiments. *Proc. of the PHYTRA2, Fez, Morocco*. September 26–28, 2011, Paper 056.

Authors

Zherdev Gennady Mikhailovitch, Leading Researcher, Cand. Sci. (Phys.-Math.)

E-mail: jerdev@ippe.ru

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

E-mail: oandrianova@ippe.ru

Teplukhina Eugenia Sergeevna, Junior Researcher

E-mail: eteplukhina@ippe.ru

Borovskaya Jeanne Vladimirovna, Junior Researcher

E-mail: borovskaya@nikiet.ru

Zhirnov Andrey Pavlovich, Deputy Head of Department

E-mail: zhirnov@nikiet.ru