

УТОЧНЕНИЕ НЕЙТРОННЫХ КОНСТАНТ КРЕМНИЯ И УРАНА НА ОСНОВЕ ИНТЕГРАЛЬНЫХ И ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

О.Н. Андрианова, Г.Б. Ломаков, Г.Н. Мантуров

АО «ГНЦ РФ-ФЭИ», 249033, г. Обнинск, Калужской обл., пл. Бондаренко, 1



Представлены результаты анализа расчетно-экспериментальных расхождений новой оценки дифференциальных (измерения функций пропускания нейтронов через образцы кремния) и интегральных экспериментов из международного справочника оцененных критических эталонных экспериментов по безопасности, выполненных для изучения свойств топливных и конструкционных материалов, на основе которых сделаны предложения по корректировке нейтронных констант. Рассматриваемая серия исследований является примером реализации схемы совместного анализа дифференциальных и интегральных экспериментов для корректировки файлов библиотеки оцененных нейтронных данных РОСФОНД. Анализируются возможные причины расчетно-экспериментальных расхождений, связанных с неопределенностями в описании резонансной структуры нейтронных сечений и влиянием резонансных эффектов на измеряемые характеристики.

Ключевые слова: оцененные нейтронные данные, библиотека РОСФОНД, критические эксперименты, критический стенд БФС, измерения функций пропускания нейтронов.

ВВЕДЕНИЕ

На протяжении десятков лет данные по реакторно-физическим экспериментам на стендах БФС ГНЦ РФ-ФЭИ широко используются для совершенствования систем константного и программного обеспечений [1], применяемых в расчетном сопровождении энергетических и исследовательских реакторов [2]. На основании экспериментов, выполненных в разные годы на различных конфигурациях и составах активных зон БФС по изучению нейтронно-физических свойств топливных и конструкционных материалов [3 – 5], получены данные по нейтронным сечениям, которые использовались для корректировки групповой системы констант БНАБ [6] и библиотеки оцененных ядерных данных (ОЯД) РОСФОНД [7].

В работе представлены результаты исследований по анализу расчетно-экспериментальных расхождений дифференциальных (измерения функций пропускания) и интегральных экспериментов (на критических сборках БФС), выполненных для изучения свойств топливных и конструкционных материалов. На основании полученных результатов предложены корректировки нейтронных данных файлов библиотеки РОСФОНД.

© **О.Н. Андрианова, Г.Б. Ломаков, Г.Н. Мантуров, 2016**

Расчеты проводились по прецизионному транспортному коду MCNP-5 [8] с поточечным представлением сечений. В приложении к задачам расчета нейтронно-физических характеристик ядерных реакторов качество расчетов, выполняемых по прецизионным кодам, определяется надежностью файлов нейтронных данных, поскольку их применение позволяет свести к минимуму методическую погрешность.

ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ПРОГРАММ

Интегральные эксперименты на критическом стенде БФС. В сотрудничестве с Национальной лабораторией Айдахо (INL, США) выполнена программа критических экспериментов на физическом стенде ГНЦ РФ-ФЭИ БФС-1, состоящая из двух серий [9]. Описание расчетных моделей приведено в международном справочнике оцененных критических эталонных экспериментов по безопасности International Criticality Safety Benchmark Evaluation Project – ICSBEP (HEU-MET-MIXED-005 и PU-MET-MIXED-001) [10].

В первой серии исследований (БФС-79) активная зона была составлена из алюминиевых труб, заполненных таблетками металлического урана (обогащение по ядрам $^{235}\text{U} \approx 90\%$) и двуокиси кремния. Во второй серии экспериментов (БФС-81) вместо урана активная зона заполнялась таблетками плутония (обогащение по ядрам $^{239}\text{Pu} \approx 95\%$). При анализе серии экспериментов по измерению возмущения критичности путем внесения в центр этих сборок высокообогащенных по ^{235}U образцов различных размеров были получены результаты, значительно отличавшиеся от получаемых с помощью прецизионных расчетных кодов, использующих детальную зависимость нейтронных данных.

В процессе измерений на критических сборках БФС-79 и БФС-81 оказалось, что реактивность, вносимая таблетками ^{235}U (90%), становится отрицательной. Обнаруженный эффект был тщательно изучен [11]. Очевидно, что такое поведение реактивности может быть обусловлено эффектом резонансной самоэкранировки ^{235}U в промежуточном спектре нейтронов. В первую очередь, эффект отрицательной реактивности связан с составом и конфигурацией активной зоны.

В работе эксперименты на сборках БФС-79 и БФС-81, состоящих, в основном, из урана, плутония и кремния, используются для уточнения и верификации нейтронных данных резонансной области сечений урана и кремния.

Измерения функций пропускания нейтронов. В ходе выполнения работы рассмотрен большой цикл исследований по расчетному описанию экспериментов, связанных с измерениями функций пропускания нейтронных пучков импульсного быстрого реактора ИБР (г. Дубна, Россия) через образцы-фильтры ^{235}U , содержание примесей в которых не превышало 10% (^{238}U – 8.8%, ^{234}U – 1.2%). Результаты этих исследований [12] вошли в базу фундаментальных экспериментов EXFOR (No.40082.2005) [13] и в ICSBEP (FUND-JINR-1/E-MULT-TRANS-001). В экспериментах исследовались эффекты резонансной самоэкранировки образцов-фильтров ^{235}U при прохождении пучка нейтронов; энергетический интервал измеряемых функций полного пропускания лежал в интервале 0.1 – 200 кэВ.

Анализ результатов экспериментальных данных и величин $\alpha = \sigma_{\gamma}/\sigma_f$ свидетельствовал о необходимости повышения сечения захвата ^{235}U в резонансной области энергий. Результаты анализа набора бенчмарк-экспериментов урановых критических систем с быстрым и промежуточным спектрами нейтронов из ICSBEP явились поводом для пересмотра существующей оценки резонансных параметров ^{235}U в энергетическом интервале от 500 до 2500 эВ.

Проанализирован ряд исследований по измерению функции пропускания нейтронов через образцы-фильтры природного кремния в интервале энергий 0.3 – 3 МэВ. Результаты экспериментов, выполненных в 1960-х гг. в ГНЦ РФ-ФЭИ на установках

ФП-1 и ФП-2 [13], помещены в базу EXFOR (No. 40082.005).

Важность экспериментов по исследованию функций пропускания нейтронов заключается в том, что они являются основным источником информации о блокировках нейтронных сечений. На основании анализа результатов таких измерений оценивают средние резонансные параметры для файлов ОЯД в области энергий, где отсутствует прямая информация о резонансной структуре сечений.

Анализ расчетно-экспериментальных зависимостей функций пропускания пучка нейтронов через образцы различных толщин урана и кремния показал, что в случае измерений с кремнием наблюдаются существенные расхождения между расчетными и экспериментальными зависимостями в функциях полного пропускания. Такие расхождения свидетельствуют о неточностях в описании резонансной области кремния в современных библиотеках оцененных ядерных данных в интервале энергий 0.3 – 0.8 МэВ.

На основании этих экспериментальных данных был выполнен анализ резонансных параметров кремния.

МЕТОДИКИ И ПРОГРАММНЫЕ СРЕДСТВА КОРРЕКТИРОВКИ КОНСТАНТ

Совместный анализ дифференциальных и интегральных экспериментов для корректировки нейтронных констант. Одним из актуальных направлений в реакторной физике является повышение точности предсказания реакторных характеристик за счет снижения константной составляющей погрешности расчета. Поскольку проведение новых экспериментов требует существенных временных и материальных затрат, наиболее реалистичным путем снижения константной погрешности расчета реакторных функционалов является использование в расчетах оцененных нейтронных данных, полученных с учетом всей (в том числе ранее не учтенной) совокупности экспериментальной информации. Следует отметить, что выполненный цикл исследований представляет собой пример реализации подхода по уточнению нейтронных констант на основании совместного использования данных дифференциальных и интегральных экспериментов и включает в себя следующие основные этапы.

1. На основе комбинаций различных секций файлов оцененных данных, теоретических и статистических подходов формируются наборы нейтронных констант, из которых оставляются для дальнейшего рассмотрения только те, для которых отсутствуют существенные расхождения с дифференциальными экспериментами.

2. По оцененному набору нейтронных констант, выбранному с учетом погрешностей дифференциальных экспериментов, рассчитываются с использованием транспортных нейтронно-физических кодов значения и погрешности нейтронно-физических характеристик, измеренных в интегральных экспериментах на критических системах.

3. Выбор наиболее приемлемого (компромиссного) варианта нейтронных констант осуществляется по результатам комплексного сопоставления расчетно-экспериментальных расхождений для выбранной совокупности дифференциальных и интегральных экспериментов, которой предложенная оценка нейтронных констант не должна противоречить.

Расчетные модели. Расчетный анализ выполнен с помощью транспортного кода MCNP-5 и актуальных версий библиотек оцененных нейтронных данных (РОС-ФОНД2010, ENDF/B-VII.1, JEFF-3.2 и JENDL-4.0). Для экспериментов по измерению функций пропускания нейтронов через образцы кремния составлены прецизионные расчетные модели, подобно тому, как были составлены бенчмарк-модели экспериментов для функций пропускания через образцы урана в ICSBER. Модели для сборок БФС-79 и БФС-81 из ICSBER были дополнены расчетом скоростей реакций и центральных коэффициентов реактивности.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Корректировка нейтронных данных урана-235. На основании метода стохастической оптимизации и статистики резонансов (распределений Портера-Томаса и Вигнера) была пересмотрена оценка области резонансов ^{235}U (Л.К. Лил и др. 1997 г. [14]) в энергетическом диапазоне от 500 до 2000 эВ, что позволило уменьшить различия между расчетом и экспериментом для систем с промежуточным спектром нейтронов и объяснить выявленные эффекты (см. рис. 1), связанные с резонансной блокировкой нейтронных сечений, обнаруженной в измерениях на сборках БФС-79 и БФС-81 [15].

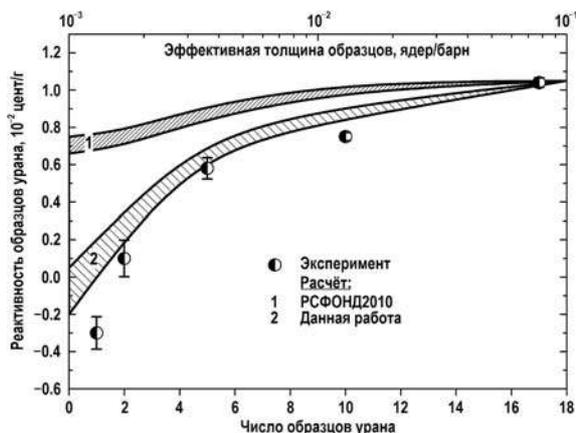


Рис.1. Эксперименты по измерению центральных коэффициентов реактивности (заштрихованные области 1 и 2 – расчетная погрешность, обусловленная неопределенностью резонансных параметров)

Корректировка нейтронных данных кремния-28. В рамках работы был выполнен подбор резонансных параметров ^{28}Si методом стохастической оптимизации для национальной библиотеки ОЯД РОСФОНД2010 так, чтобы расчетные значения зависимостей функций пропускания наилучшим образом описывали экспериментальные кривые с точки зрения минимизации расчетно-экспериментальных расхождений (рис. 2).

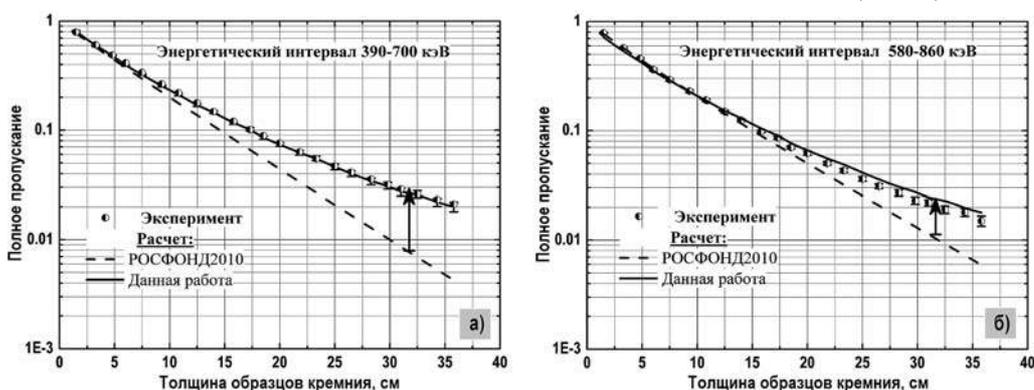


Рис. 2. Расчетные и экспериментальные зависимости функции пропускания нейтронов от толщины образцов кремния, усредненные по энергетическим интервалам: а) – интервал 390 – 700 кэВ; б) – интервал 580 – 860 кэВ

Проанализированные зависимости измерений функций полного пропускания нейтронов указывают на необходимость пересмотра принятых оценок резонансных параметров кремния и проведение более детальных экспериментов по изучению энергетической зависимости нейтронных сечений в данной области энергий.

Варианты откорректированных констант были протестированы в расчетах функционалов измеряемых на сборках БФС-79 и БФС-81.

Сравнение результатов расчетно-экспериментальных расхождений реакторных фун-

кционалов для предложенных данных по ^{235}U и ^{28}Si приведено в табл. 1 и на рис. 3.

Таблица 1

Сравнение расчетно-экспериментальных расхождений реакторных функционалов для критических сборок БФС и предложенных откорректированных данных для ^{235}U и ^{28}Si

Индекс	Эксперимент [15, 16]	Оцененные нейтронные данные	Расчет/эксперимент-1, %
БФС-79-5			
$\sigma_f(^{238}\text{U}) / \sigma_f(^{235}\text{U})$	0.0150 ± 0.005	РОСФОНД2010	6.7 ± 3.8
		РОСФОНД2010+ ^{235}U	2.0 ± 3.9
		РОСФОНД2010+ ^{28}Si	5.3 ± 3.8
		РОСФОНД2010+ ^{235}U + ^{28}Si	2.6 ± 3.9
$\sigma_c(^{197}\text{Au}) / \sigma_f(^{235}\text{U})$	1.15 ± 0.05	РОСФОНД2010	-21.7 ± 4.9
		РОСФОНД2010+ ^{235}U	-4.4 ± 4.7
		РОСФОНД2010+ ^{28}Si	-2.6 ± 4.7
		РОСФОНД2010+ ^{235}U + ^{28}Si	-4.4 ± 4.7
БФС-81-1			
$\sigma_f(^{238}\text{U}) / \sigma_f(^{235}\text{U})$	0.0168 ± 0.0005	РОСФОНД2010	3.5 ± 3.2
		РОСФОНД2010+ ^{235}U + ^{28}Si	2.0 ± 3.1
$\sigma_c(^{197}\text{Au}) / \sigma_f(^{235}\text{U})$	1.11 ± 0.05	РОСФОНД2010	2.5 ± 4.2
		РОСФОНД2010+ ^{235}U + ^{28}Si	-0.2 ± 4.0

На рисунке 3 приведены расчетные значения эффективного коэффициента размножения, полученные по разным библиотекам ОЯД, в зависимости от типа конфигурации в порядке возрастания значения числа делений в тепловой области энергий (характеристика среднего спектра нейтронов по активной зоне).

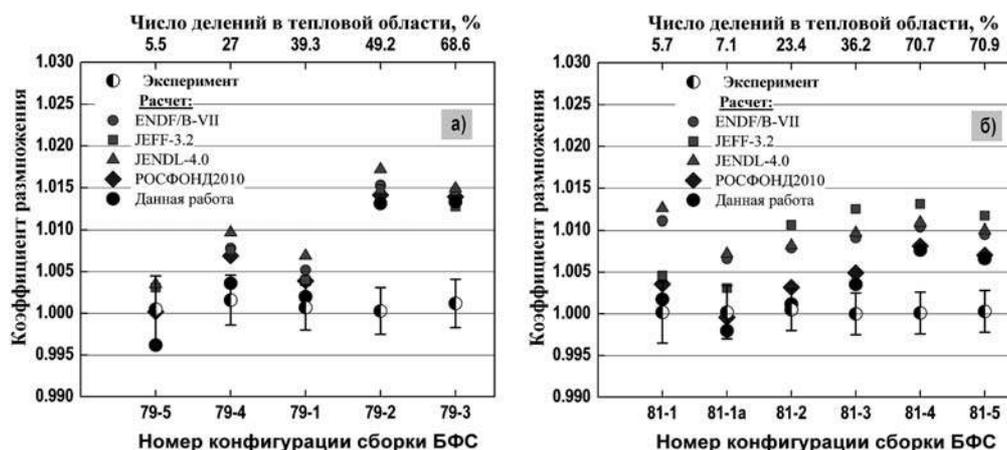


Рис. 3. Расчетные и экспериментальные коэффициенты критичности с использованием различных библиотек оцененных нейтронных данных: а) – сборки серии БФС-79; б) – сборки серии БФС-81

Из представленных результатов расчетов видно, что использование откорректированных данных позволяет значительно сократить расчетно-экспериментальные расхождения даже в эффективном коэффициенте размножения нейтронов для систем с быстрым и промежуточным нейтронными спектрами. Для систем с тепловым спектром внесенные коррективы нейтронных данных не приводят к сокращению расчетно-экспериментальных расхождений, как и следовало ожидать, поскольку изменения вносились

только в резонансную область энергии. Авторы осознают, что предложенные объяснения обнаруженных расхождений, вероятно, не единственно возможные. Очевидно, что переоценка всей резонансной области ^{235}U и ^{28}Si на основании новых экспериментальных данных по дифференциальным и интегральным экспериментам позволит в будущем избежать выявленных противоречий в описании обнаруженных экспериментальных эффектов. Тем не менее, выявленные расхождения, по мнению авторов, свидетельствуют о необходимости совершенствования знаний о резонансных эффектах сечений элементов в области энергий быстрых и промежуточных нейтронов, для которой поиск приемлемой оценки будет представлять непростую задачу.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рассматриваемая серия исследований является примером реализации подхода корректировки оцененных нейтронных констант на основании результатов совместного анализа дифференциальных и интегральных экспериментов. В рамках работы выполнена новая (более детальная) оценка экспериментов по изучению резонансной структуры полного сечения кремния, выполненных на ускорительной установке Ван-де-Граафа ГНЦ РФ-ФЭИ. Представлены результаты корректировки резонансной области нейтронных сечений ^{235}U и ^{28}Si , полученные методом стохастической оптимизации для национальной системы нейтронных данных РОСФОНД, позволившие дать расчетное объяснение наблюдаемым в экспериментах эффектам резонансной самоэкранировки сечений.

Авторы выражают благодарность профессору М.Н. Николаеву и профессору В.А. Дулину за плодотворные дискуссии и помощь при выполнении работы.

Литература

1. Николаев М.Н. Константное обеспечение расчётов быстрых реакторов. Путь к современному состоянию и задачи дальнейшего развития // Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2013. – №4. С. 5 – 16.
2. Evaluation of Proposed Integral Critical Experiments with Low-moderated MOX Fuel. Report ISBN 92-64-01049-1. NEA No. 6047 OECD 2005.
3. Кошечев В.Н., Мантуров Г.Н., Николаев М.Н., Цибуля А.М. Верификация нейтронных данных основных реакторных материалов из библиотеки РОСФОНД на интегральных экспериментах // Известия высших учебных заведений. Ядерная энергетика. – 2014. – №1. С. 204 – 214.
4. Кочетков А.Л., Матвеев И.П., Рожихин Е.В., Цибуля А.М. Эксперименты в поддержку размещения МОХ-топлива в реакторы ВВЭР // Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2007. – №3-1. С. 99 – 108.
5. Кочетков А.Л., Матвеев И.П., Семенов М.Ю., Хомяков Ю.С., Цибуля А.М. Критические эксперименты на стенде БФС-2 в поддержку размещения МОХ-топлива в реакторы БН // Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2007. – №2. С. 16 – 27.
6. Мантуров Г.Н., Николаев М.Н., Цибуля А.М. Система групповых констант БНАБ-93. Часть 1. Ядерные константы для расчета нейтронных и фотонных полей излучений // Вопросы атомной науки и техники: Сер. Ядерные константы. – 1996. – Вып. 1. – С. 59–103.
7. Забродская С.В., Игнатюк А.В., Кошечев В.Н., Манохин В.Н., Николаев М.Н., Проняев В.Г. РОСФОНД – Российская национальная библиотека оцененных нейтронных данных // Вопросы атомной науки и техники. Сер.: Ядерные константы. – 2007. – Вып. 1-2. С. 3–21 (доступна на сайте <http://www.ippe.ru/podr/abbn/libr/rosfond.php>).
8. «MCNP – A General Monte Carlo N-Particle Transport Code, Version 5», Volume I (LA-UR-3-1987), Volume II (LA-CP-03-0245), Volume III (LA-CP-03-0284).
9. Nikolaev M., Tsiboulia A., Matveenko I., Briggs J.B., Dean V.F. Criticality experiments: analysis, evaluation, and programs. 4. Benchmark Experiments with Silicon Dioxide Waste Matrix. Transactions of the American Nuclear Society; v. 84; ISSN 0003-018X; Worldcat; CODEN TANSAO; 2001. PP. 280-282; American Nuclear Society 2001 Annual Meeting.
10. International Handbook of Evaluated Criticality Safety Benchmark Experiments, Organization for Economic Cooperation and Development – Nuclear Energy Agency, NEA/NSC/DOC(95)03 (September 2011 Edition).

11. Павлова О.Н., Дулин В.А. К вопросу о резонансной самоэкранировке сечений захвата и деления урана-235 // Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2005. – №2. С. 75 – 86.
12. Григорьев Ю.В., Сеница В.В., Борзаков С.Б., Илчев Г.Л., Файков-Станьчик Х., Пантелеев Ц.Ц., Янева Н.Б. Исследование нейтронных сечений и величины $\alpha = \sigma_{\text{в}} / \sigma_{\text{д}}$ для ^{235}U в области энергий 1 МэВ – 2 эВ // Вопросы атомной науки и техники. Сер.: Ядерные константы. – 2000. – Вып. 1.
13. Николаев М.Н., Филиппов В.В. Измерение структуры полных сечений / Англо-советский семинар: Ядерные константы для расчета реакторов. – Дубна, 1968.
14. Leal L.C., Derrien H., Larson N.M., Guber K.H., Valentine T.E. and Sayer R.O. Nuclear Data Measurements, Analysis and Evaluation at the Oak Ridge National Laboratory in Support of Nuclear Criticality Safety. *Journal of Nuclear Science and Technology*, Supplement 2. PP. 1422-1426 (August 2002).
15. Андрианова О.Н. Методы и программы для оценки влияния неопределенностей резонансной структуры нейтронных сечений на расчетные характеристики ядерных реакторов / Дис. на соиск. учен. степ. к.т.н. по спец. 05.14.03 (22.12.2015) / НИЦ «Курчатовский институт». – Москва, 2015. – 152 с.
16. A. Tsiboulia, I. Matveenko, M. Nikolaev, PU-MET-MIXED-001. Critical Experiments with Heterogeneous Compositions of Plutonium, Silicon Dioxide, and Polyethylene. International Handbook of Evaluated Criticality Safety Benchmark Experiments, NEA/NSC/DOC(95)03, September 2006 Edition.

Поступила в редакцию 12.03.2016 г.

Авторы

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

Ломаков Глеб Борисович, научный сотрудник
E-mail: glomakov@ippe.ru

Мантуров Геннадий Николаевич, начальник лаборатории
E-mail: mant@ippe.ru

UDC 539.17.013

IMPROVEMENT BOTH OF SILICON AND URANIUM NEUTRON DATA BASED ON INTEGRAL AND DIFFERENTIAL EXPERIMENTS

Andrianova O.N., Lomakov G.B., Manturov G.N.

JSC «SSC RF-IPPE», 1 Bondarenko sq., Obninsk, Kaluga reg., 249033 Russia

ABSTRACT

This paper presents the results of calculation-to-experiment discrepancy analysis for differential (neutron transmission measurements) and integral experiments from ICSBEP Handbook (series of critical assemblies BFS-79 and BFS-81) carried out at the IPPE to examine the properties of fuel and structural materials on the basis of which were made proposals to corrections of neutron cross-sections for the Russian national library of evaluated neutron data (ROSFOND). The considered study is an example of implementing the framework for co-utilization of differential and integral experiments for neutron data adjustments, which demonstrate the impact of the resonance structure in neutron cross-sections on reactor characteristics measured at the BFS facilities.

One of the current trends in reactor physics is to improve accuracy of reactor characteristics assessment by reducing the neutron data uncertainty component in the overall calculation error. Sophisticated statistical approaches have been proposed and are nowadays widely used for the assessment of reactor characteristics uncertainties

caused by nuclear data. Especially valuable is that such approaches provide capabilities to propagate point-wise nuclear data uncertainty on reactor characteristics uncertainties that allows carrying out neutron cross-sections adjustments with due account for both differential and integral experiments.

Neutron cross-sections testing and adjustments can be carried out based on new and more precise measurements of nuclear interaction characteristics as well as by means of reevaluation of the existing experimental data sets. Since the capabilities of recent experimental techniques have been virtually exhausted and carrying out new experiments requires substantial time and material expenditures, the most realistic way to reduce the neutron data uncertainty in reactor functional calculations is to use evaluated neutron data obtained by taking into account all the experimental data including previously unconsidered.

Key words: evaluated neutron data, ROSFOND library, critical experiments, BFS facility, neutron transmission.

REFERENCES

1. Nikolaev M.N. Nuclear Data for Calculations of Fast Reactors. Way to Recent State and Tasks for Future Development. *Izvestia vuzov. Yadernaja energetika*. 2013, no. 4, pp. 5–16 (in Russian).
2. Evaluation of Proposed Integral Critical Experiments with Low-moderated MOX Fuel. Report ISBN 92-64-01049-1. NEA No. 6047 OECD 2005.
3. Koscheev V.N., Manturov G.N., Nikolaev M.N., Tsiboulia A.M. Verification of neutron data for main reactor materials from rosfond neutron data library on intergral experiments. *Izvestia vuzov. Yadernaja energetika*. 2014, no. 1, pp. 204–214 (in Russian).
4. Kochetkov A.L., Matveenko I.P., Rozhikhin E.V., Tsiboulia A.M. Experiments within maintenance of placement MOX-fuel in reactors VVER]. *Izvestia vuzov. Yadernaja energetika*. 2007, no. 3-1, pp. 99–108 (in Russian).
5. 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 vuzov. Yadernaja energetika*. 2007, no. 2, pp. 16–27 (in Russian).
6. Manturov G., Nikolaev M., Tsiboulia A. ABBN-93 Group Constants System. Part 1: Nuclear Constants for Calculation of Neutron and Photon Radiation Fields. *Voprosy atomnoj nauki i tehniki: Ser. Yadernye konstanty*. 1996, v. 1, pp. 59–103 (in Russian).
7. Zabrodskaia S.V., Ignatiuk A.V., Koshcheev V.N., Manokhin V.N., Nikolaev M.N. Proniaev VG ROSFOND – The National Library of evaluated neutron data. *Voprosy atomnoj nauki i tehniki. Ser. Yadernye konstanty*. 2007, iss. 1-2, pp. 3–21 (in Russian).
8. "MCNP – A General Monte Carlo N-Particle Transport Code, Version 5", Volume I (LA-UR-3-1987), Volume II (LA-CP-03-0245), Volume III (LA-CP-03-0284).
9. Nikolaev M., Tsiboulia A., Matveenko I., Briggs J.B., Dean V.F. Criticality experiments: analysis, evaluation, and programs. 4. Benchmark Experiments with Silicon Dioxide Waste Matrix. *Transactions of the American Nuclear Society*; v. 84; ISSN 0003-018X; Worldcat; CODEN TANSO; 2001; pp. 280-282; American Nuclear Society 2001 Annual Meeting.
10. International Handbook of Evaluated Criticality Safety Benchmark Experiments, Organization for Economic Cooperation and Development – Nuclear Energy Agency, NEA/NSC/DOC(95)03 (September 2011 Edition).
11. Pavlova O.N., Doulin V.A. About the Resonance Self-Shielding for Radioactive and Fission Capture of Uranium-235]. *Izvestia vuzov. Yadernaja energetika*. 2006, no. 2, pp. 75-84 (in Russian).
12. Grigor'ev Yu.V., Sinica V.V., Borzakov S.B., Ilchev G.L., Fajkov-Stan'chik H., Pantelev C.C., Janeva N.B. Issledovanie nejtronnyh sechenij i velichiny $\alpha = \sigma_f / \sigma_{tot}$ dlya ^{235}U v oblasti energij 1 MeV – 2 eV. [The study of neutron cross sections and the alpha - value for ^{235}U in the energy region from 1 MeV -to 2 eV] *Voprosy atomnoj nauki i tehniki. Ser. Yadernye konstanty*. 2000, v. 1, pp. 3–9 (in Russian).
13. Nikolaev M.N., Filippov V.V. Measurement of Total Cross-section Structure. Conf: Nuclear Data for Computations Sem. Dubna, Joint Institute for Nuclear Research, 1968.

14. Leal L.C., Derrien H., Larson N.M., Guber K.H., Valentine T.E. and Sayer R.O. Nuclear Data Measurements, Analysis and Evaluation at the Oak Ridge National Laboratory in Support of Nuclear Criticality Safety. *Journal of Nuclear Science and Technology*. Supplement 2, pp. 1422-1426 (August 2002).

15. Andrianova O.N. *Metody i programmy dlya ocenki vliyaniya neopredelennostej rezonansnoj struktury neitronnykh sechenij na raschetnye harakteristiki yadernykh*. [Methods and codes to assess the impact of uncertainties in the resonance structure of neutron cross sections on nuclear reactors characteristics Cand. tech. sci. diss.]. Moscow. NRC «Kurchatov Institute». 2015, 152 p. (in Russian)].

16. Tsiboulia A., Matveenko I., Nikolaev M., PU-MET-MIXED-001. Critical Experiments with Heterogeneous Compositions of Plutonium, Silicon Dioxide, and Polyethylene. International Handbook of Evaluated Criticality Safety Benchmark Experiments, NEA/NSC/DOC(95)03, September 2006 Edition.

Authors

Andrianova Ol'ga Nikolaevna, Senior Researcher

E-mail: oandrianova@ippe.ru

Lomakov Gleb Borisovich, Researcher

E-mail: glomakov@ippe.ru

Manturov Gennady Nikolaevich, Head of Laboratory

E-mail: mant@ippe.ru