

5. **Shmakov V., Cherepanova E., Klimova L. e.a.** Possibility of accuracy conservation in Monte Carlo calculations using thinned files of nuclear data. — In: Proc. of the Fifth Intern. Conf. on Nuclear Data for Science and Technology. USA, May 9—13, 1994, v. 2, p. 822—824.
6. **Шмаков В.М., Глазков Е.А., Черепанова Е.И. и др.** Получение и использование сечений в области неразрешенных резонансов. — В сб.: XII Межд. конф. Забыхинские научные чтения. Снежинск, 2014.
7. **Shmakov V.M.** Calculation and use of effective pointwise cross-sections in unresolved resonance region. — In: Proc. the Intern. Cooperation in Nuclear Criticality Safety ICNC-2015. Charlotte, USA, September 14—18, 2015, CD № 14605.
8. **MacFarlane R., Muir D.** The NJOY Nuclear Data Processing System. Version 91. LA-12740-M, October 1994.
9. **MCNP** — a General N-Particle Transport Code, Version 5. Volume I: Overview and Theory. LA-UR-03-1987, April 24, 2003.
10. **Arnautova M.A., Kandiev Ya.Z., Lukhminsky B.E. e.a.** Monte-Carlo simulation in nuclear geophysics. Intercomparison of the PRIZMA Monte Carlo program and benchmark experiments. — Nucl. Geophys., 1993, v. 7, № 3, p. 407—418.

Поступила в Редакцию 1.06.15

УДК 621.039.516

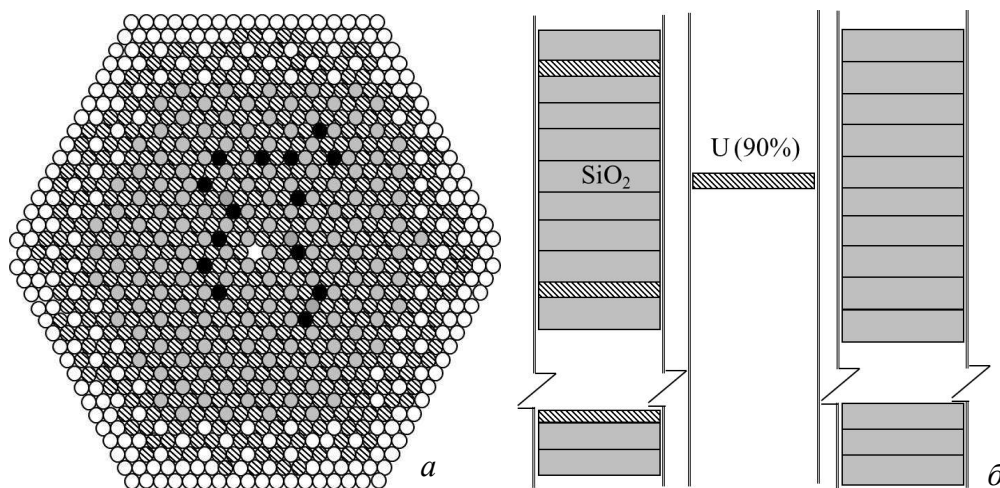
ВЛИЯНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ РЕЗОНАНСНОЙ СТРУКТУРЫ ^{235}U НА РАСЧЕТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ КРИТИЧЕСКИХ СБОРОК БФС СО СМЯГЧЕННЫМ СПЕКТРОМ НЕЙТРОНОВ

*Андреанова О.Н., Дулин В.А., Дулин В.В. (АО «ГНЦ РФ — ФЭИ», г. Обнинск),
Андреанов А.А. (НИЯУ МИФИ, г. Москва)*

На основании экспериментов по изучению нейтронно-физических свойств основных топливных, конструкционных и прочих материалов, выполненных в разные годы на БФС с различной конфигурацией и составом активной зоны, были получены данные для корректировки групповой системы констант БНАБ [1, 2]. Одно из направлений в данной области заключалось в изучении корректности подходов и приближений учета эффектов резонансной блокировки групповых сечений (факторы резонансной самоэкранировки).

Рассмотренные в настоящей работе эксперименты на сборках БФС-79 и -81 (макеты геологических хранилищ) вошли в международный справочник эталонных реакторных экспериментов, их детальное описание представлено в разделах NEU-MET-MIXED-005 [3] и PU-MET-MIXED-001 [4] соответственно. Эти экспериментальные исследования позволили получить данные для проверки нейтронных констант кремния, важных с точки зрения оценки возможности автокаталитической цепной реакции при подземном захоронении отработавшего ядерного топлива. Эксперименты послужили отправной точкой цикла исследований, в рамках которых был выполнен детальный анализ резонансных параметров оцененных нейтронных данных для ^{235}U в области промежуточной энергии.

Описание эксперимента. В начале 2000-х гг. в ГНЦ РФ — ФЭИ в сотрудничестве с Национальной лабораторией Айдахо (INL, США) были проведены критические эксперименты на физическом стенде БФС-1. Цель экспериментов состояла в получении данных, применимых для верификации расчетов безопасности хранения остеклованных радиоактивных отходов, в частности, в хранилище в Юкка-Маунтин (штат Невада, США). В первой серии экспериментов активная зона критической сборки БФС-79 состояла из алюминиевых труб внешним диаметром 5 см, толщиной стенки 0,1 см, высотой около 200 см в гексагональной решетке, заполненных таблетками металлического урана обогащением ~90%, внешним диаметром 4,6 см, высотой 0,5 см, массой 148 г в алюминиевой оболочке толщиной 0,03 см и таблетками диоксида кремния высотой 2 см (рис. 1). Отношение концентрации ядер кислорода и урана составляло 58. Вторая серия экспериментов на сборке БФС-81 была аналогична первой, за исключением того, что вместо высокообогащенного урана трубы активной зоны заполняли таблетками плутония с содержанием ^{239}Pu 95%, внешним диаметром 4,6 см, высотой 0,23 см, массой 54 г. Отношение концентрации ядер кислорода и плутония равнялось 47.



Р и с. 1. Картограмма загрузки критической сборки БФС-79-5 при измерении коэффициента реактивности образцов ^{235}U (а), схема размещения образцов ^{235}U в центральном канале активной зоны (б): $\bullet$ — топливная труба; $\odot$ — труба с SiO_2 ; $\circ$ — труба отражателя

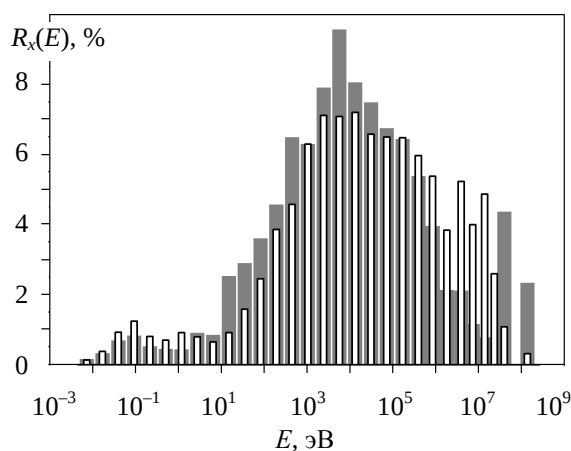
В экспериментах по измерению возмущения реактивности путем внесения в центр сборки высокообогащенных образцов ^{235}U различного размера и их анализа были получены результаты, которые значительно отличались от расчетных данных с использованием оправдавших себя моделей [5, 6]. Суть отличий заключалась в следующем. Известно, что внесение ^{235}U всегда сопровождалось увеличением критичности реактора, т.е. вносимая образцом дополнительная реактивность оказывалась всегда положительной. Тем не менее при измерениях на критической сборке БФС-79-5 оказалось, что реактивность, вносимая таблетками и трубками урана обогащением $^{235}\text{U} \sim 90\%$ и толщиной в диапазоне 0,3—0,6 мм, становится отрицательной. Эффект был тщательно изучен на образцах разных конфигураций, обогащения и их положений (табл. 1). С увеличением толщины образца до 5 мм реактивность становилась положительной.

Очевидно, что такое изменение реактивности урана может быть обусловлено эффектом резонансной самоэкранировки ^{235}U в промежуточном спектре нейтронов. Конечно, в первую очередь, эффект отрицательной реактивности тонких образцов связан с составом и конфигурацией активной зоны. Особенностью спектра нейтронов, сформированного, например, в сборке БФС-79-5, является сосредоточение более половины захватов нейтронов в интервале энергии 4,65—2150 эВ, из которых $\sim 70\%$ на ядрах ^{235}U . Как показано на рис. 2, относительная скорость захвата нейтронов ядрами в данном ин-

тервале превышает относительную скорость деления.

Расчетная оценка эксперимента в групповом приближении. В работе [7] была предпринята попытка объяснения расхождения между расчетной оценкой и экспериментальными данными на БФС-79-5 погрешностью констант, связанной с неточностью данных о резонансном захвате ^{235}U . Реактивность образцов рассчитывали по теории возмущения путем решения прямого и сопряженного уравнения переноса нейтронов в одномерном транспортно-интегральном приближении. Расчеты проводили в групповом приближении с использованием констант БНАБ-93 (базовый расчет, 28 групп).

Для оценки корректности приближений расчетной модели было выполнено сравнение



Р и с. 2. Распределение относительной скорости реакций захвата (■) и деления (□) от энергии, рассчитанное в центре активной зоны БФС-79-5

Таблица 1. Экспериментальные коэффициенты реактивности образцов высокообогащенного урана

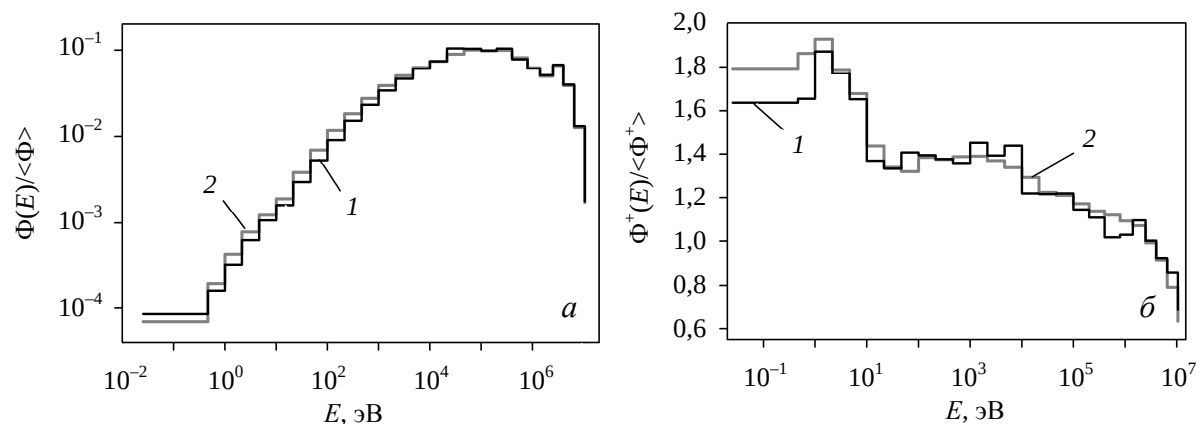
Тип образца	Число образцов	Эффективная толщина, ядро/б	Высота, диаметр образца, см	Масса U, г	Масса и тип оболочки, г	Обогащение U, %	Реактивность, $10^{-5} \beta/\text{г}$
Металлический уран	2	0,0020	13 0,6	16,22	15,68 (сталь)	88,6	$-3,08 \pm 0,2^*$ $-4,03 \pm 0,8^{**}$
	1	0,0026	0,0276 4,6	8,58	1 (Al) 0,25 (Ni)	89,7	$-1,84 \pm 0,03^*$ $-5,01 \pm 0,03^{**}$ $-20,0 \pm 1,1^{***}$
	2	0,0052	0,0552 4,6	17,15	2 (Al) 0,65 (Ni)	89,7	$3,14 \pm 0,06^*$ $0,350 \pm 0,014^{**}$ $0,02 \pm 0,40^{***}$
	5	0,0125	0,138 4,6	42,88	5 (Al) 1,7 (Ni)	89,7	$6,67 \pm 0,07^*$ $5,53 \pm 0,06^{**}$ $21,3 \pm 0,2^{***}$
	10	0,0236	0,276 4,6	85,75	10 (Al) 2,5 (Ni)	89,7	$8,16 \pm 0,03^*$ $7,59 \pm 0,03^{**}$
	17	0,0386	0,5 4,6	147,8	4,1 (Al)	89,3	$10,68 \pm 0,02$ $10,36 \pm 0,02$
Диоксид урана	1	0,0039	0,113 4,6	15	5,78 (сталь)	90,1	$1,80 \pm 0,01^*$ $-1,35 \pm 0,02^{**}$
	1	0,0039	0,113 4,6	15	5,78 (сталь)	36,2	$-3,14 \pm 0,01^*$ $-6,30 \pm 0,02^{**}$
	1	0,0039	0,113 4,6	15	5,78 (сталь)	0,42	$-2,32 \pm 0,01^*$ $-5,52 \pm 0,03^{**}$

*, **, *** Коэффициент реактивности в центральной плоскости, на высоте 7,2 см выше центральной плоскости сборки БФС-79-5, в центральной плоскости сборки БФС-81-1 соответственно.

расчетного потока и ценности нейтронов, усредненного по ячейке одномерной модели, с расчетами по трехмерной модели с использованием кода ММК (метод Монте-Карло) (рис. 3). Согласование расчета и эксперимента было достигнуто внесением изменений в сечения радиационного захвата ^{235}U и факторы резонансной самоэкранировки. Аргументом в пользу внесения этих изменений послужило то, что максимум захвата нейтронов ядрами ^{235}U в спектре,

сформированном в центре активной зоны БФС-79-5, приходится на промежуточную область энергии. Эта область энергии играет сравнительно небольшую роль в быстрых и тепловых реакторах, поэтому ранее не подвергалась серьезной проверке в макроскопических экспериментах и, скорее, типична для солевых реакторов.

Оказалось, что расчетное описание эксперимента удается достигнуть при внесении сле-



Р и с. 3. Распределение относительного потока (а) и ценности (б) в центральном канале активной зоны БФС-79-5, рассчитанное по одномерной (1) и трехмерной модели (2)

дующих изменений в нейтронные константы ^{235}U (БНАБ-93):

уменьшение факторов резонансной самоэкранировки радиационного захвата при снижении сечения разбавления;

увеличение групповых сечений захвата нейтронов в этой области энергии.

Внесенные изменения свидетельствуют о том, что сечения захвата и деления должны блокироваться по-разному: захват блокируется сильнее, чем деление при сечении разбавления, типичном для тонких образцов.

Для иллюстрации того, что предложенные изменения групповых нейтронных констант не противоречат известным и хорошо описываемым экспериментам с быстрым спектром нейтронов, был проведен расчет подобных экспериментов на сборках БФС-26, КБР-3 [5, 6].

Ячейка сборки БФС-26 состояла из таблетки обогащенного урана, как и ячейка БФС-79-5, из ~ 12 см железа, алюминия и графита. Зависимость групповых ценностей была близка к данным БФС-79-5, но спектр содержал заметно меньше нейтронов энергией ниже 1 кэВ. Сборка КБР-3 состояла из таблеток коррозионно-стойкой стали и таблеток высокообогащенного урана массой 8 г. Ее спектр нейтронов был близок к БФС-26, но ценность нейтронов слабо зависела от их энергии (рис. 4).

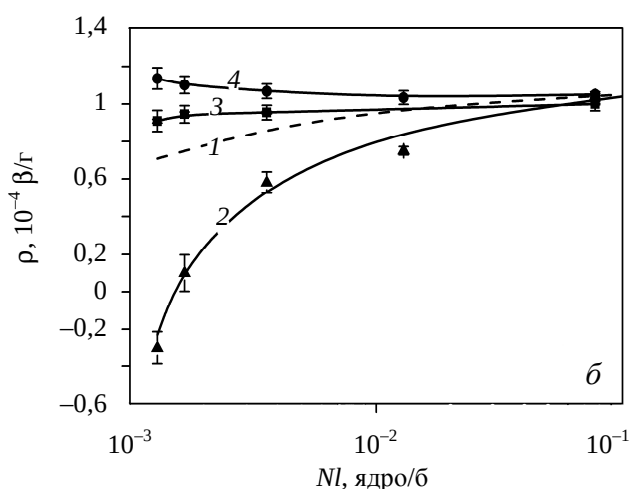
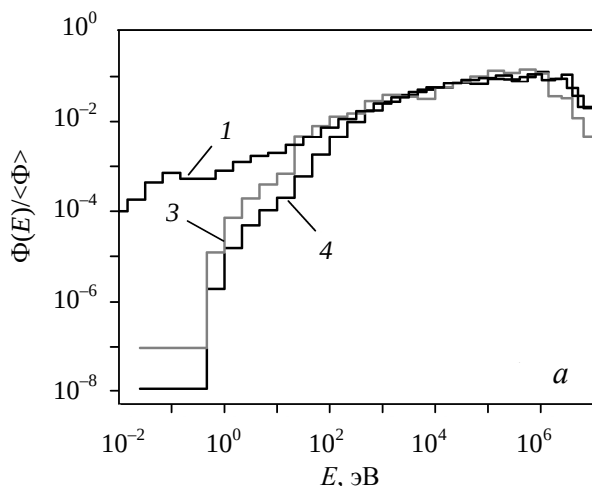
Отрицательная реактивность ^{235}U наблюдалась и на сборке БФС-81-1 (PU-MET-MIXED-001), ячейка которой вместо таблеток 90%-ного обогащенного урана содержала таблетки плутония (см. табл. 1). В работе [7] результаты рас-

четного анализа эксперимента на БФС-81-1 не приведены, тем не менее, как оказалось, изменение нейтронных данных приводит, как и в случае с БФС-79-5, к лучшему согласию эксперимента и расчета и для него. Работа [7] показала необходимость уточнения резонансной структуры сечений захвата ^{235}U , основными задачами которого должно было стать выявление возможных причин и физическое обоснование введения поправок в факторы самоэкранировки при малых сечениях разбавления и сечения захвата.

Расчетная оценка эксперимента в потоочном представлении нейтронных сечений.

Основным источником неопределенности резонансных параметров является пропуск узких резонансов [8]. Выделяют две причины таких пропусков. Первая заключается в том, что вблизи верхней границы области разрешенных резонансов большая часть узких резонансов плохо разрешима. Если вклад, который могли бы вносить в факторы самоэкранировки эти пропущенные резонансы, незначителен, то резонансные пропуски компенсируются добавками в плавные подложки сечений. Подобная компенсация в данном случае не отражается на факторах резонансной самоэкранировки, она влияет лишь на среднее сечение.

Вторая причина пропуска резонансов заключается в том, что d -резонансы уже p -резонансов, которые, в свою очередь, уже s -резонансов. Поэтому энергия, начиная с которой p -резонансы разрешены, находится ниже границы разрешимости s -резонансов, d -резонансы



Р и с. 4. Распределение относительного потока (а), расчетная и соответственно измеренная на стенде БФС-79-5 (1, 2, ▲), КБР-3 (3, ■), БФС-26 (4, ●) зависимость реактивности от размера вносимого образца ^{235}U (б): ---, — исходные и скорректированные данные в групповом приближении (настоящая работа) соответственно

становятся неразрешенными, начиная с еще более высокой энергии. Поэтому области неразрешенных p - и d -резонансов обычно налагаются на область разрешенных s -резонансов. В библиотеках оцененных ядерных данных это учитывается аналогично: описание известных или оцененных резонансов в виде плавной подложки в области неразрешенных резонансов или введение фиктивных резонансов в области разрешенных резонансов. Предпочитается последнее, так как узкие резонансы более подвержены самоэкранировке, чем широкие и, следовательно, ошибка, вызванная неучтенной слабой подложкой, будет пренебрежимо малой.

Анализ принятой в настоящее время оценки резонансной области ^{235}U выявил существенный пропуск резонансов с малой нейтронной шириной в области энергии разрешенных резонансов. Подробно анализ влияния учета пропущенных резонансов на расчетные нейтронно-физические характеристики интегральных бенчмарк-экспериментов приведен в исследовании [9]. Изложим ключевые моменты выполненного в работе [8] исследования.

Статистический метод восстановления пропущенных в экспериментах и неучтенных в оценках узких резонансов был проведен на основании распределений Портера—Томаса и Вигнера. Была разработана методика пополнения совокупности разрешенных резонансов, оценки их параметров и погрешностей. Данная методика позволила расширить область резонансов ^{235}U в энергетическом диапазоне 500—2000 эВ.

Приемлемый набор резонансов и их параметров, на основании которых восстанавливается ход поточечного представления сечений, выбирали по результатам минимизации различия с экспериментальным ходом реактивности образцов при условии, что остальные функционалы (интегральные сечения, $k_{\text{эф}}$, скорость реакций и др.) останутся в пределах экспериментальных погрешностей и при этом не будет противоречий с другими интегральными экспериментами (на сборках с тепловыми и быстрыми спектрами нейтронов) и дифференциальными экспериментами по измерению интегральных сечений. Диапазон изменения параметров (положения и парциальной ширины) был определен на предварительном этапе в ходе решения задачи с недоопределенным и переопределенным числом

резонансов и анализа задачи в групповом приближении.

Для отбора приемлемого варианта в работе посредством вариантных расчетов методом перебора был осуществлен поиск числа недостающих резонансов и их параметров. Неудовлетворительные наборы резонансов отсеивались в том случае, если интегральные по различным энергетическим областям сечения, $k_{\text{эф}}$, скорость реакций и др. функционалы выходили за экспериментальные погрешности. Из оставшихся вариантов методом перебора был выбран приемлемый, который наиболее близко описал эксперименты на сборках с промежуточным спектром нейтронов. В табл. 2 показаны введенные изменения в резонансную область и увеличение групповых сечений радиационного захвата, обусловленное учетом неразрешенных резонансов.

Т а б л и ц а 2. Изменения, вносимые в интегральные характеристики добавленными узкими резонансами ^{235}U

Изменение, %	E, эВ	
	465—1000	1000—2150
Число добавленных резонансов	20	40
Резонансный интеграл	6,41 ($J = 3$)	5,85 ($J = 3$)
	15,06 ($J = 4$)	14,42 ($J = 4$)
Сечение захвата	11,5	10,9

На основании полученной оценки резонансной области ^{235}U была проведена серия расчетов по MCNP5 бенчмарк-моделей экспериментов из справочника ICSBEP [9] с обогащенным ураном для систем с быстрым (серия HEU-MET-FAST), промежуточным (серия HEU-MET-INTER) и тепловым спектром нейтронов (серия HEU-THERM-SOL). Показано, что влияние пропущенных резонансов на критичность систем с быстрым и тепловым спектром нейтронов мало: в большинстве сборок доля захватов на ядрах ^{235}U при энергии 500—2250 эВ низкая, поэтому влияние увеличения сечения захвата в этой области на интегральные характеристики сборок мало. Так, максимальный вклад в $k_{\text{эф}}$ составляет ~0,06% в тепловом (HEU-THERM-SOL ICSBEP), ~0,01% в быстром спектре нейтронов (HEU-THERM-SOL ICSBEP), что намного меньше расчетных погрешностей, составляющих ~0,3%. Более существенным рассматриваемое измене-

Таблица 3. Расчетно-экспериментальное расхождение реакторных функционалов сборки БФС-79

Функционал	Эксперимент	Р/Э—1, %
$k_{эф}$	$1,0005 \pm 0,0040$	$0,3 \pm 0,4^*$ $-0,1 \pm 0,4^{**}$
$\sigma_f(^{238}\text{U})/\sigma_f(^{235}\text{U})$	$0,0150 \pm 0,0005$	$4,8 \pm 4,0^*$ $2,0 \pm 4,1^{**}$
$\sigma_c(^{197}\text{Au})/\sigma_f(^{235}\text{U})$	$1,15 \pm 0,05$	$-21 \pm 4,8^*$ $-4,3 \pm 4,7^{**}$

*, ** Расчетно-экспериментальное расхождение, полученное по системе констант РОСФОНДа [10] и скорректированным данным (настоящая работа).

ние сечения захвата является для сборок, значительная доля спектра которых приходится на область промежуточных нейтронов. Примером такой сборки является БФС-79-5 (HEU-MET-INTER-005). Увеличение сечения захвата за счет учета вклада пропущенных резонансов привело в этой сборке к снижению $k_{эф}$ на 0,4% (результат расчета по константам РОСФОНДа снизился с 1,0035 до 0,9995, т.е. почти совпал с экспериментальной единицей, табл. 3). Учитывая, что погрешность расчета $k_{эф}$ систем с высокообогащенным ураном в настоящее время может быть снижена примерно до 0,2%, смещение $k_{эф}$ на 0,4% нельзя считать пренебрежимо малым. Результат с индексом $\sigma_c(^{197}\text{Au})/\sigma_f(^{235}\text{U})$ также интересен: на протяжении ~20 лет на стендах БФС этот индекс расходился с расчетами по диффузионным кодам в групповом приближении на 8—16%, что свидетельствовало о необходимости перехода к детальному описанию геометрии

при расчетном моделировании экспериментов с индикационными фольгами.

Результаты работы инициировали проведение серии исследований по уточнению оценок ядерных данных ^{235}U , прежде всего структуры делительных и захватных резонансов в области промежуточной энергии нейтронов. В результате были оценены резонансные параметры ^{235}U во всей области разрешенной энергии и вычислены ковариационные матрицы погрешностей резонансных параметров. Была проведена серия расчетов коэффициентов реактивности в центральной плоскости с учетом неопределенности резонансных параметров. На рис. 5 показано, как предложенная в работе оценка резонансной области ^{235}U и погрешностей резонансных параметров позволила описать эксперименты на критических сборках БФС-79-5, КБР-3 и БФС-26 с теми же образцами урана. Таким образом, учет пропущенных резонансов позволил существенно сократить расчетно-экспериментальные расхождения для систем с промежуточным спектром нейтронов.

Заключение. Как представляется, в части уточнения резонансной области эксперименты по измерению коэффициентов в центральной плоскости реактивности не имеют альтернативы и позволяют более тонко отражать особенности резонансной структуры, что оказывается затруднительным с использованием метода времени пролета.

Предложенные объяснения обнаруженных эффектов, вероятно, не единственно возможные: возможно, что переоценка всей резонансной об-

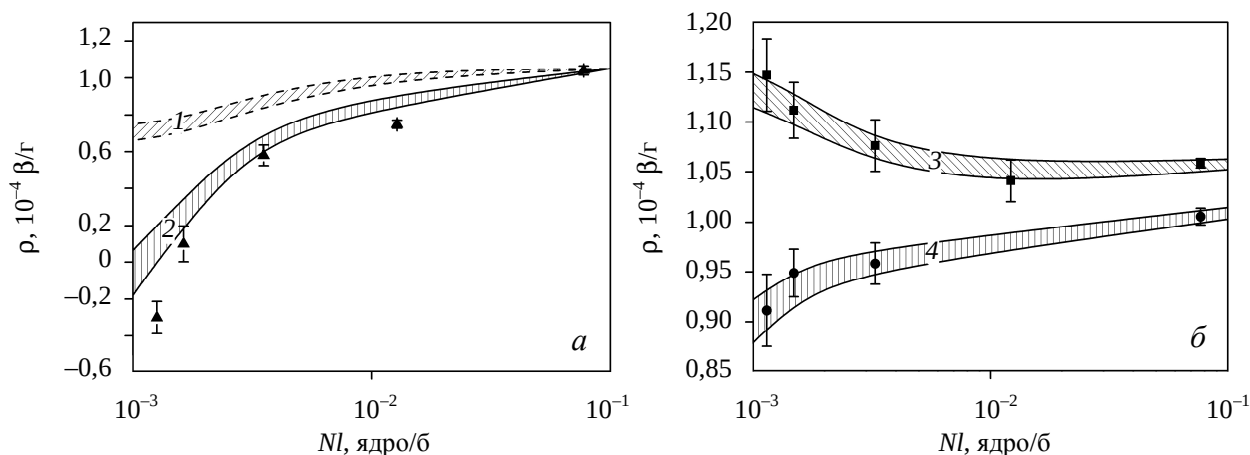


Рис. 5. Расчетная (а) и соответственно измеренная (б) на стенде БФС-79-5 (1, 2, ▲), КБР-3 (3, ■), БФС-26 (4, ●) зависимость реактивности от размера вносимого образца ^{235}U : 1, 2 — исходные и скорректированные (настоящая работа) данные соответственно (область расчетных значений за счет неопределенности в резонансной области сечений ^{235}U заштрихована)

ласти ^{235}U на основании новых экспериментальных данных о дифференциальных и интегральных экспериментах позволит описать поведение кривой для самых тонких образцов. Тем не менее выявленные эффекты на БФС и результаты исследований других групп, например, в рамках международного проекта CIELO OECD/NEA свидетельствуют о необходимости совершенствования знаний о резонансах ^{235}U в области энергии промежуточных нейтронов, для которой поиск приемлемой оценки будет представлять непростую задачу. Выполненная оценка представляется приемлемой: она не противоречит известным экспериментальным данным, но позволяет корректно отразить наблюдаемое изменение реактивности. Возможно, что в дальнейшем описание и других экспериментальных данных из табл. 1 будет полезным.

Авторы выражают благодарность М.Н. Николаеву за полезные обсуждения и руководство работами по оценке резонансной области для ^{235}U .

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Дулин В.А., Казанский Ю.А., Мамонтов В.Ф., Сидоров Г.И. Некоторые физические исследования на быстрых критических сборках БФС-1. — Атомная энергия, 1976, т. 40, вып. 5, с. 377—381.
2. Абагян Л.П., Базазянц Н.О., Николаев М.Н., Цибуля А.М. Групповые константы для расчета реакторов и защиты. Справочник. М.: Энергоиздат, 1981.
3. Matveenko I., Semenov M., Rozhikhin Ye. HEU-MET-INTER-005 — Critical Experiments with Heterogeneous Compositions of Highly Enriched Uranium, Silicon Dioxide and Polyethylene. ICSBEP, NEA/NSC/DOC, 2010.
4. Matveenko I., Semenov M., Rozhikhin Ye. PU-MET-MIXED-001 — Critical Experiments with Heterogeneous Compositions of Highly Enriched Uranium, Silicon Dioxide and Polyethylene. ICSBEP, NEA/NSC/DOC, 2010.
5. Дулин В.А. Возмущение критичности реакторов и уточнение групповых констант. М.: Атомиздат, 1979.
6. Бедняков С.М., Голубев В.И., Дулин В.А. и др. Экспериментальное обоснование методов оценки возмущений критичности быстрых сборок малыми образцами. — Атомная энергия, 1988, т. 65, вып. 6, с. 426—430.
7. Павлова О.Н., Дулин В.А. К вопросу о резонансной самоэкранировке сечений захвата и деления урана-235. — Изв. вузов. Ядерная энергетика, 2005, № 2, с. 75—86.
8. Павлова О.Н., Николаев М.Н. Восстановление пропущенных резонансов урана-235 в области энергий 500—2500 эВ. — Вопросы атомной науки и техники. Ядерные константы, 2006, вып. 1—2, с. 70—79.
9. International Handbook of Evaluated Criticality Safety Benchmark Experiments. NEA/NSC/DOC(95)03/I—IX, OECD/NEA, September 2012 Edition.
10. Забродская С.В., Игнатюк А.В., Кощеев В.Н. и др. РОСФОНД — Российская национальная библиотека оцененных нейтронных данных. — Вопросы атомной науки и техники. Ядерные константы, 2007, вып. 1—2, с. 3—21.

Поступила в Редакцию 28.01.16

УДК 915.148.13.12

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ЯДЕРНЫЕ РЕАКТОРЫ АЭС КАК ИСТОЧНИКИ ^{14}C

Рублевский В.П., Яценко В.Н. (ФГБУ ГНЦ ФМБЦ им. А.И. Бурназяна ФМБА России, г. Москва)

Целью настоящей статьи является определение выбросов ^{14}C энергетическими реакторами АЭС. Представленные материалы являются продолжением подобных исследований, проведенных на промышленных реакторах [1].

Исследования по определению фактических выбросов ^{14}C энергетических ядерных реакторов разного типа были проведены в 1975—1990 гг. на всех действующих в то время АЭС. В 1995—2001 гг. было проведено несколько контрольных выездов на АЭС для подтверждения полученных ранее результатов. Установка, используемая для отбора проб газоаэрозольных выбросов, позволяла выделить углерод, содержащийся как в форме CO_2 , так и сумму возможных его газо-

образных химических соединений (CO , C_nH_m) и аэрозолей. В настоящее время на АЭС внедряются промышленные приборы подобного типа.

В реакторах разного типа ^{14}C в большинстве случаев образуется по реакции (n, p) благодаря большому сечению взаимодействия нейтронов с атомами ^{14}N и его высокому содержанию в естественной смеси изотопов азота (табл. 1).

В табл. 2 приведены расчетные оценки выброса ^{14}C РБМК и ВВЭР с коэффициентом использования установленной мощности 0,65 и 0,7 соответственно. Как видно из табл. 2, выброс ^{14}C АЭС с РБМК-1000 в среднем в 10 раз больше, чем АЭС с ВВЭР-1000, -440. Выброс РБМК-1000 примерно на 90% обуславливается