

Таким образом, исследования позволили оценить спектральный состав нейтронов в центральном экспериментальном канале ИГР. Опыт работы и анализ экспериментов позволят в дальнейшем исследовать спектр нейтронов в центральном канале при разогретой активной зоне и в боковом экспериментальном канале.

В организации и проведении экспериментов большую помощь оказали сотрудники физического отделения РФЯЦ—ВНИИТФ и эксплуатационный персонал ИГР, которые авторы выражают благодарность.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований по проекту № 99-02-17325.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Курчатов И.В., Фейнберг С.М., Доллежалъ Н.А. и др. Импульсный графитовый реактор ИГР. — Атомная энергия, 1964, т. 17, вып. 6, с. 463—474.
2. Васильев А.П., Горин Н.В., Кандиев Я.З. и др. Исследование трехмерного нейтронного поля в активной зоне ИГР. — Там же, 1997, т. 82, вып. 6, с. 407—413.
3. Горин Н.В., Кандиев Я.З., Козыбаев Р.М. и др. Исследование нейтронного поля в центральном канале ИГР при движении поглотителя нейтронов. — Там же, 1998, т. 85, вып. 6, с. 474—476.
4. Горин Н.В., Кандиев Я.З., Козыбаев Р.М. и др. Эффект «просветления» уран-графитового топлива ИГР. — Там же, 1998, т. 85, вып. 5, с. 419—422.
5. Arnautova M.A., Kandiev Ya.Z., Lukhminsky B.E., Malishkin G.N. Monte-Carlo simulation in nuclear geophysics. Incomparision of the PRIZMA Monte-Carlo program and benchmark experiments. — Nucl. Geophys., 1993, № 3, p. 407—418.
6. Васильев А.П., Кандиев Я.З., Читайкин В.И. Расчеты некоторых опытов на системах из урана-235 и урана-238 со спектральными нейтронными константами БАС. — В кн.: Нейтронная физика, 1984, т. 2, с. 119—123.
7. Литвин В.И., Лукин А.В., Соколов Ю.А. и др. Критические benchmark эксперименты и измерения чисел реакций с цилиндрическими системами из урана, плутония и полиэтилена на стенде ФКБН: Препринт РФЯЦ—ВНИИТФ, 1999, № 159.
8. Григорьев Е.И., Колерова О.Н., Тарновский Г.Б., Ярына В.П. Библиотека классифицированных спектров нейтронов БКС-2. — В кн.: Материалы 3-го Всес. сов. «Метрология нейтронного излучения на реакторах и ускорителях». М., ЦНИИАтоминформ, 1983.
9. Брисман Б.А., Генералова В.В., Крамер-Агеев Е.А., Трошин В.С. Внутрореакторная дозиметрия. Практическое руководство. М.: Энергоатомиздат, 1985.
10. Фройнд Г., Искендерян Х., Окренг Д. Импульсный реактор TREAT с графитовым замедлителем для экспериментов по кинетике. Доклад Р-1848 на 2-й Женевской конф. по мирному использованию атомной энергии, 1958, т. 10, с. 461.
11. Горин Н.В., Кандиев Я.З., Казьмин Ю.М. Расчетное исследование физических процессов в ИГР по программе ПРИЗМА.Д. — Атомная энергия, 2000, т. 88, вып. 2, с. 83—88.

Поступила в Редакцию 28.07.2000

УДК 621.039.51

ИЗМЕРЕНИЕ ДОПЛЕР-ЭФФЕКТА РЕАКТИВНОСТИ УРАНА И ПЛУТОНИЯ В БЫСТРЫХ КРИТИЧЕСКИХ СБОРКАХ

Тамбовцев С.Д., Дулин В.А. (ГНЦ РФ — ФЭИ им. А.И. Лейпунского)

Влияние температуры на поглощение нейтронов в резонансах макроскопических сред изучали посредством нагревания всей среды. При этом измеряли полный доплер-эффект реактивности: с повышением температуры поглощение нейтронов в резонансах увеличивалось, однако спектр нейтронов при этом становился высокоэнергетическим, что уменьшало скорость поглощения нейтронов низкоэнергетическими резонансами. Для разделения этих эффектов и выделения эффекта увеличения ширины резонансов без сильного искажения спектра реактора или критической сборки используют технику

нагрева малых образцов. В работе [1] было описано экспериментальное исследование доплер-эффекта ^{238}U в серии быстрых физическихборок FCA путем измерения коэффициентов реактивности холодных и горячих образцов. Однако расчетный анализ таких экспериментов и рекомендации о точности расчета на основе константного обеспечения при этом не обсуждались.

Аналогичные работы были начаты на стенде БФС около 10 лет назад с использованием измерительной техники, близкой к технике FCA. Был разработан также метод расчетного анализа [2], позволяющий сопоставлять результаты измерений с расчетами, использующими факторы резонансного самоэкранирования (и их доплеровские приращения) системы групповых констант БНАБ-78 [3]. Такой подход позволял учесть доплеровские приращения и в области неразрешенных резонансов.

В настоящей работе приведены результаты измерений с нагреванием образцов из диоксида обедненного урана и энергетического плутония в нескольких сборках. Для урана приведен расчетный анализ экспериментов.

Доплер-эффект D определяли по разности возмущений критичности сборки ρ при осциллировании образца в холодном (27 °C) и горячем состоянии (600 °C):

$$D = \frac{\rho_{\text{г}} - \rho_{\text{х}}}{\rho_{\text{х}}}, \quad (1)$$

где $\rho_{\text{г}}$, $\rho_{\text{х}}$ — реактивность (возмущение критичности) в результате внесения горячего и холодного образца соответственно.

Нагреватель с образцом помещали в центр критической сборки в полости, образующейся после удаления центрального канала. Нагреватель состоял из двух тонкостенных (0,2 мм) стальных цилиндров с нихромовой спиралью и изоляцией из кварцевой ткани массой 21,5 г. Длина нагревателя 185 мм, что значительно больше длины образца. Внутренний диаметр нагревателя, где помещается образец, равен 30 мм, наружный — 40 мм. Температурное поле возле образца внутри нагревателя и в зоне возле нагревателя контролировали несколькими хромель-копелевыми и хромель-алюмелевыми термопарами.

Через полость между наружной стенкой нагревателя и внутренней стенкой трубы-контейнера прокачивали воздух с помощью автономной воздуходувки. Это обеспечивало условия теплосъема, при которых установившаяся температура в сборке вблизи нагревателя не превышала во время проведения измерений 40 °C (повышалась не более чем на 18—20 °C), в то время как температура образца и нагревателя составляла 600 °C. В полости помещали тонкий дополнительный экран, обдуваемый воздухом, что существенно уменьшало передачу тепла за счет теплового излучения, главного в данном случае способа переноса тепла. Отметим, что в экспериментах FCA этому обстоятельству не было уделено должного внимания, теплоизоляция обеспечивалась вакуумированием нагревателя [4].

Изменение реактивности $\Delta\rho_R$ образца элемента R при изменении температуры рассчитывали в рамках специально разработанной одномерной плоской модели [5], описывающей гетерогенную структуру БФС и КБР и основанной на использовании интегрально-транспортного приближения для расчета пространственного распределения по ячейке групповых потоков и ценностей.

Резонансная структура среднего по изучаемому образцу потока нейтронов φ может быть представлена (в соответствии с приближением Вигнера для вероятности нейтронам после взаимодействия с элементом R вылететь за пределы образца) суммой двух составляющих. Одна из них — это поток нейтронов, испытавших последнее столкновение в окружающей образец среде. Его резонансная структура в соответствии с представлениями системы констант БНАБ определяется сечением разбавления изучаемого элемента. Другая — это нейтроны, последнее столкновение которых было с ядрами материала образца, имеющего среднюю хорду $l_R = 4V/S$ и плотность ядер N_R :

$$\varphi^j(\sigma_0, N_R l_R) = \frac{(\sigma_{Rp}^j + \sigma_1) \varphi^{j'}}{\sigma_{Rt}^j + \sigma_1 + 1/N_R l_R} + \frac{(\sigma_{Rp}^j + \sigma_0) \varphi^{j'} / N_R l_R}{(\sigma_{Rt}^j + \sigma_0)(\sigma_{Rt}^j + \sigma_1 + 1/N_R l_R)}.$$

Здесь $\varphi^{j'}$ — поток вдали от резонанса; σ_0, σ_1 — сечения разбавления для изучаемого элемента R (соответственно в критической сборке и образце; если образец из диоксида, то $\sigma_1 = 2\sigma_t$ кислорода); σ_{Rp} — потенциальное сечение рассеяния элемента R ; σ_{Rt}^j — его полное сечение.

Если образец и окружающая его среда имеют разную температуру, то и соответствующие сечения элемента R в формуле, связанные с образцом и средой, также должны быть взяты при разной температуре. При таком подходе для расчета резонансного поглощения удобно использовать представление об обобщенном групповом коэффициенте самоэкранирования реакции типа X элемента R в образце размером $N_R l_R$, помещенном в среду с сечением разбавления σ_0 [2]:

$$d_x(\sigma_0, \sigma_1, \Delta T) = \frac{\sum_k a_k^j \sigma_{Rx}^{jk} [(\sigma_{Rp}^j + \sigma_1) / (\sigma_{Rt}^{jk} + \sigma_1 + 1/N_R l_R) + (\sigma_{Rt}^{jk} + \sigma_0) / N_R l_R / (\sigma_{Rt}^{jk} + \sigma_1 + 1/N_R l_R)]}{\sigma_{Rx}^j \sum_k (\sigma_{Rp}^j + \sigma_0) / (\sigma_{Rt}^{jk} + \sigma_0)}, \quad (2)$$

где a_k^j — относительная доля подгрупп; j — номер группы; k — номер подгруппы.

Составляющая захвата реактивности образца элемента R записывается в виде

$$\rho_R(l_R, T) = \sum_{j=1}^{26} \varphi_{\text{гет}}^{j+} \sigma_{cR}^j d_c(\sigma_0, \sigma_1, T) \varphi_{\text{гет}}^j, \quad (3)$$

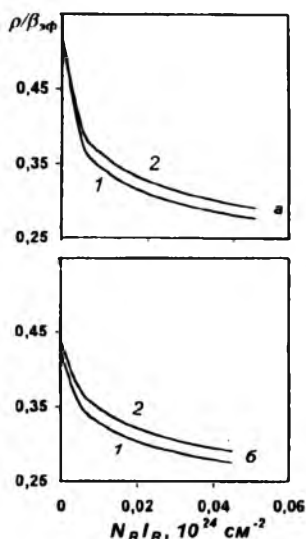
где $\varphi_{\text{гет}}^{j+}, \varphi_{\text{гет}}^j$ — средняя по образцу групповая ценность и поток.

При $N_R l_R \rightarrow 0$ и $T_2 \rightarrow T_1$ коэффициент d_x переходит в традиционный фактор [6] резонансного самоэкранирования f_x .

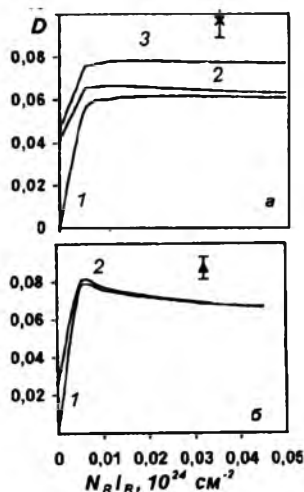
Вероятность для нейтронов после взаимодействия с элементом R вылететь за пределы образца рассчитывали также с помощью более точного приближения Белла. При этом различие между результатами было значительно меньше статистической погрешности измерений.

Для расчета коэффициентов d_x были подготовлены подгрупповые параметры ^{238}U , причем от температуры зависели только подгрупповые сечения, но не их доля a_k^j . Исходной информацией для получения подгрупповых параметров служили факторы самоэкранирования и сечения системы групповых констант БНАБ. Было предложено получить такие подгрупповые параметры подгонкой по методу наименьших квадратов. Кроме факторов самоэкранирования, подгонку осуществляли для доплеровских приращений при 600 и 1800 °С. Доплеровские приращения и факторы резонансного самоэкранирования включали в целевую функцию с весовыми коэффициентами, которые можно интерпретировать в качестве погрешностей, приписываемых значениям этих функционалов в точках подгонки. Подгонка целевой функции осуществлялась стандартной вычислительной процедурой, реализующей метод Левенберга—Марквардта.

При анализе эксперимента проводили также расчеты доплер-эффекта для случая $\sigma_0 \rightarrow \infty$ (бесконечного сечения разбавления активной зоны критической сборки). Часть нейтронов, попадающих из сборки в образец, сталкивается с ядрами материалов нагревателя и теряет информацию о резонансной структуре сборки (разблокируется). При поглощении в образце эти нейтроны, естественно, не проявляют свойств, которые



Р и с. 1. Реактивность образца из диоксида обедненного урана при 27 °С (1) и 600 °С (2) в критической сборке КБР-14 для бесконечного (а) и реального сечения разбавления (б) активной зоны критической сборки



Р и с. 2. Зависимость доплер-эффекта реактивности от размера образца для бесконечного (1), реального сечения разбавления (2) активной зоны, с учетом спектральной поправки (3) и результаты экспериментов в КБР-14 (а) и КБР-15 (б)

обусловлены резонансной структурой потока в активной зоне критической сборки, а ведут себя как пришедшие из среды, не содержащей исследуемого материала (с бесконечным сечением разбавления). Следовательно, экспериментальный доплер-эффект должен сравниваться с расчетным, полученным для реального сечения разбавления активной зоны и бесконечного сечения разбавления. Доля каждого значения определяется вероятностью столкновения нейтронов с ядрами материалов нагревателя и трубы-контейнера. Оценки показывают, что таких нейтронов 25—30%.

Рассчитанные согласно соотношениям (1)—(3) зависимости реактивности и доплер-эффекта от размера образца представлены на рис. 1, 2. При этом в расчете реактивности учитывали также составляющие рождения и неупругого замедления нейтронов на ядрах образцов, независимые от температуры. За основу расчета взяты (как это и делается при анализе таких экспериментов [6, 7]) спектры и ценности гомогенного расчета КРАБ с использованием констант БНАБ-78 [3]. Влияние гетерогенной структуры на сечения, потоки и ценности учтено согласно описанной в работе [5] методике.

Кроме эффекта разблокировки потока нейтронов материалами нагревателя, исследовали вопрос о том, в какой мере расхождение расчетного и экспериментального доплер-эффекта можно объяснить неточностью расчетного спектра критической сборки. Неточность расчетного спектра проявлялась в расхождении экспериментального и расчетного индекса $\langle \sigma_c^{Au} \rangle / \langle \sigma_f^5 \rangle$ (этот функционал в быстрых критических сборках считается хорошим индикатором для такой проверки [6]). Увеличение доли расчетного спектра в 12-й—18-й группах позволило существенно уменьшить разницу значений рассматриваемого индекса и внести соответствующую поправку в расчетный доплер-эффект (см. рис. 2, кривая 3). Расчетный спектр в 12-й—18-й группах плавно с увеличением номера группы изменялся («смягчался») таким образом, что расчетное и экспериментальное $\langle \sigma_c^{Au} \rangle / \langle \sigma_f^5 \rangle$ совпало.

В ходе измерений золотые фольги активировали в тепловой колонне, в центре активной зоны, а также на поверхности образца внутри нагревателя (отдельная фольга и четыре вместе). Активация в нагревателе оказалась равной средней по ячейке, т.е. в этих сборках экспериментальное устройство не искажает заметным образом групповые потоки нейтронов. Характеристики критическихборок и результаты измерений приведены в табл. 1, 2.

По результатам измерений можно отметить следующее:

размеры образца из диоксида урана достаточны для установления в нем собственной резонансной структуры, что и проявляется в «платообразном» поведении $D(N_R I_R)$;

измеренный доплер-эффект реактивности для ^{238}U примерно на 20% больше расчетного. По-видимому, это не объясняется полностью погрешностью расчета спектра (см. рис. 2) и погрешностью эксперимента.

Т а б л и ц а 1. Основные характеристики активных зон критических сборок

Характеристика	КБР-14	КБР-15	БФС-54	БФС-61
Топливо	UO ₂	UO ₂	UO ₂	PuUO ₂
Содержание основного делящегося изотопа	0,19	0,89	0,21	0,16
Объемная доля:				
топлива	0,18	0,02	0,4	0,3
стали	0,82	0,98	0,25	0,2
натрия	—	—	0,35	0,5*
Доля нейтронов ниже 10 кэВ	0,13	0,16	0,09	0,05

*В состав активной зоны вместо натрия входит свинец.

Т а б л и ц а 2. Результаты измерения доплер-эффекта реактивности ($D = \rho_r/\rho_x - 1$)

Сборка	Образец	
	UO ₂ , длина 110, диаметр 20 мм, масса 305 г, масса контейнера 16 г	PuO ₂ , получен в ВВЭР, длина 112, диаметр 4,8 мм, масса 9,7 г, масса контейнера 10,8 г
КБР-14	0,097±0,008	
КБР-15	0,087±0,006	
БФС-54	0,073±0,011	0,005±0,015
БФС-61	0,031±0,003	0,016±0,005

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Mukayama T., Okajima S. Neutron spectrum dependence of natural UO₂ doppler effect measured in FCA. — Nucl. Sci. Technol., 1983, v. 22, № 3, p. 243.
2. Тамбовцев С.Д., Дулин В.А. Изучение доплер-эффекта ²³⁸U и плутония в быстрых критических сборках. — Вопросы атомной науки и техники. Сер. Ядерные константы, 1991, вып. 4, с. 85—90.
3. Абагян Л.П., Базазянц Н.О., Бондаренко И.И., Николаев М.Н. Групповые константы для расчета реакторов и защиты. М.: Энергоиздат, 1981.
4. Okajima S. Analysis of Doppler Effect Measurement in FCA Cores using JENDL-3.2 Library. PHYSOR-96, E-247.
5. Дулин В.А. Оценка экспериментального возмущения критичности реакторов при внесении малых образцов. — Атомная энергия, 1989, т. 66, вып. 2, с. 79—82.
6. Бедняков С.М., Дулин В.А., Мантуров Г.Н. и др. Проверка нейтронных данных для изотопов плутония в экспериментах на быстрых физических сборках. — Там же, 1996, т. 80, вып. 6, с. 454.
7. Бедняков С.М., Безбородов А.А., Дулин В.А. и др. Проверка некоторых реакторных функционалов в экспериментах на быстрых критических сборках. — Там же, 1990, т. 69, с. 68—73.

Поступила в Редакцию 10.03.2000

УДК 621.039.9

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ВОРОНКИ ВЫБРОСА ПРИ ЯДЕРНОМ ВЗРЫВЕ

Фокин В.А. (Горный институт Кольского научного центра РАН)

Многолетний опыт взрывов на выброс с использованием зарядов обычных химических взрывчатых веществ позволил накопить богатый статистический материал, результатом обобщения которого явилась известная расчетная формула

$$Q = q_b W^m F(n), \quad (1)$$