

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Андреев Б.М., Зельвенский Я.Д., Кательников С.Г. Тяжелые изотопы водорода в ядерной технике. М.: Энергоатомиздат, 1987. 456 с.
2. Андреев Б.М., Карпов М.В., Перевезенцев А.Н. и др. Перспективы использования методов химического изотопного обмена для решения задач детритизации водных отходов ядерной и термоядерной энергетики. — В сб.: Водородная энергетика и технология, 1992, вып. 1, с. 57—68.
3. Proc. 5-th Meeting of Tritium Techn. in Fission, Fusion and Isotopic Application. — In: Fus. Technol., 1995, v. 28, № 3.
4. Андреев Б.М., Раков Н.А., Розенкевич М.Б., Сахаровский Ю.А. Использование методов разделения изотопов для улавливания и концентрирования трития в ядерном топливном цикле. — Радиохимия, 1997, т. 39, вып. 2, с. 97—111.
5. Сахаровский Ю.А., Розенкевич М.Б., Андреев Б.М. и др. Очистка водных потоков от трития методом химического изотопного обмена водорода с водой. — Атомная энергия, 1998, т. 85, вып. 1, с. 35—40.
6. Andreev B.M., Magomedbekov E.P., Park Y.S. et al. The development of the water waste deirritization technology of nuclear complex plants. — In: Proc. of Annual Meeting on Nuclear Techn., Munchen, 1998, p. 325—328.
7. Андреев Б.М. Химический изотопный обмен — современный способ производства тяжелой воды. — Хим. пром-сть, 1999, № 4, с. 219—224.
8. Андреев Б.М., Магомедбеков Э.П., Пак Ю.С. и др. Перспективы использования химического изотопного обмена для разделения изотопов водорода. — Атомная энергия, 1999, т. 86, вып. 3, с. 198—203.
9. Алексеев И.А., Архипов Е.А., Бондаренко С.Б. и др. Опыт эксплуатации опытно-промышленной установки для переработки тяжелой и легкой воды, загрязненной тритием. Тезисы докл. 4-й Всерос. конф. «Физ.-хим. процессы при селекции атомов и молекул», Звенигород, 1999, с. 50.
10. Trenin V.D., Alekseev I.A., Bondarenko S.D. et al. Experimental industrial plant for studies and development of the reprocessing technology of tritiated water wastes. — Fus. Technol., 1998, v. 31, p. 963—966.
11. Андреев Б.М., Магомедбеков Э.П., Пак Ю.С. и др. Некоторые особенности технологии разделения изотопов водорода методом химического изотопного обмена водорода с водой. — Атомная энергия, 1998, т. 85, вып. 1, с. 40—45.
12. Беловодский Л.Ф., Гаевой В.К., Гришмановский В.И. Тритий. М.: Энергоатомиздат, 1985. 248 с.
13. Якименко Л.М., Модылевская И.Д., Ткачек З.А. Электролиз воды. М.: Химия, 1970. 236 с.
14. Якименко Л.М. Электродные материалы в прикладной электрохимии. М.: Химия, 1977. 264 с.
15. Водород. Свойства, получение, хранение, транспортирование, применение. Под ред. Д.Ю. Гамбурга и Н.Ф. Дубовкина. М.: Химия, 1989. 672 с.
16. Фатеев В.Н., Порембский В.И., Самойлов Д.И. Электрохимический метод получения тяжелой воды и изотопов водорода. — В кн.: Изотопы. Свойства, получение, применение. Под ред. В.Ю. Баранова. М.: ИздАт, 2000, с. 147—157.
17. Андреев Б.М., Марченко А.А., Пахомов В.П. и др. Изотопные эффекты при электролизе воды в ячейке с твердым полимерным электролитом. — Журн. физ. химии, 1988, т. 62, № 6, с. 1661—1663.

Поступила в Редакцию 28.07.2000

УДК 621.039.573

РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ СПЕКТРА НЕЙТРОНОВ ИГР

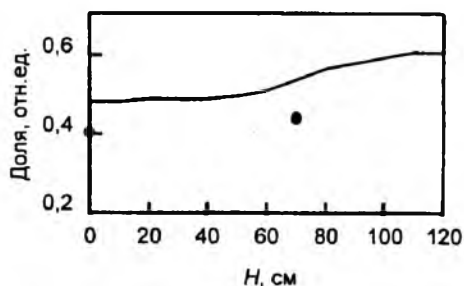
*Горин Н.В., Кандиев Я.З., Литвин В.И. (РФЯЦ — ВНИИТФ),
Гайдайчук В.А., Казьмин Ю.М., Пахниц В.А., Скивка А.С.
(ИАЭ НЯЦ Республики Казахстан), Васильев А.П. (НИКИЭТ),
Павшук В.А., Рычев А.С. (РНЦ «Курчатовский ин-т»)*

В настоящее время на реакторе ИГР [1] исследуют спектральный состав нейтронов, который имеет особенности, связанные как с конструкцией реактора, так и с разогревом активной зоны. По расчетам около половины нейтронов ИГР — тепловые, они находятся в тепловом равновесии с материалом активной зоны, и их энергия определяется ее температурой. Температура топлива вблизи центрального экспериментального канала для пуска реактора с максимальным энерговыделением изменяется от 300 до 1700 К, следовательно, энергия тепловых нейтронов в начале и конце одного и того

же пуска будет существенно различаться. Отличается и доля тепловых нейтронов в спектре в центре и на периферии центрального экспериментального канала, там, где к активной зоне примыкает масса холодного графита отражателя. К боковому экспериментальному каналу по всей его высоте примыкает графит отражателя, и это скажется на спектре нейтронов в нем.

Для обоснования экспериментов, проводимых на реакторе, и корректной интерпретации результатов необходимо знание энергетического спектра нейтронов, в котором облучаются исследуемые сборки. Настоящая работа является продолжением предыдущих расчетно-экспериментальных исследований характеристик полей нейтронов ИГР [2—4]. Целью экспериментов было определение спектрального состава нейтронов в экспериментальном канале реактора при температуре топлива активной зоны, близкой к комнатной, сравнение результатов экспериментов и расчетов и, следовательно, проверка программы ПРИЗМА.Д [5] и системы констант БАС [6], подготовка к предстоящим измерениям спектра нейтронов при разогревом до 1400 К топливе активной зоны.

Впервые экспериментальные данные о спектральном составе поля нейтронов в активной зоне ИГР были получены в 1964 г. в процессе исследований физических характеристик реактора. По экспериментальным данным был определен расчетным путем спектр быстрых нейтронов, нормированный на абсолютный поток нейтронов с использованием пороговых реакций $^{32}\text{S}(n, p)^{32}\text{P}$ и $^{27}\text{Al}(n, \alpha)^{24}\text{Na}$. Эксперименты на реакторе проведены в 1998—1999 гг.



Р и с. 1. Зависимость доли тепловых нейтронов в спектре от положения в центральном канале: — — расчет по программе ПРИЗМА; ● — эксперимент

Результаты расчетов. Изменение доли тепловых нейтронов (с граничной энергией 0,6 эВ) в спектре при комнатной температуре активной зоны в зависимости от положения в центральном канале представлено на рис. 1. Видно, что в центральной части канала на протяжении ± 40 см вверх и вниз от центра доля тепловых нейтронов постоянна, по мере приближения к границам активной зоны и далее в глубь отражателя, где расположена большая масса чистого графита, доля тепловых нейтронов увеличивается.

Активационные и делительные нейтронные детекторы. Для измерения спектра нейтронов ИГР использован следующий набор ак-

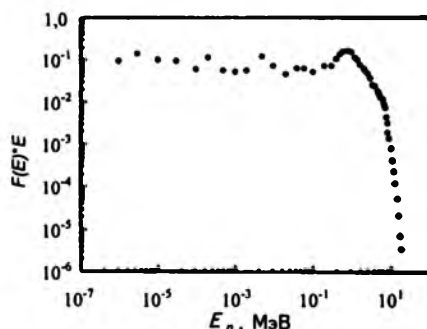
тивационных и делительных детекторов с периодом полураспада более 0,5 сут: $^{176}\text{Lu}(n, \gamma)^{177}\text{Lu}$, $^{197}\text{Au}(n, \gamma)^{198}\text{Au}$, $^{152}\text{Sm}(n, \gamma)^{153}\text{Sm}$, $^{186}\text{W}(n, \gamma)^{187}\text{W}$, $^{139}\text{La}(n, \gamma)^{140}\text{La}$, $^{59}\text{Co}(n, \gamma)^{60}\text{Co}$, $^{63}\text{Cu}(n, \gamma)^{64}\text{Cu}$, $^{23}\text{Na}(n, \gamma)^{24}\text{Na}$, $^{50}\text{Cr}(n, \gamma)^{51}\text{Cr}$, $^{45}\text{Sc}(n, \gamma)^{46}\text{Sc}$, $^{235}\text{U}(n, f)$, $^{239}\text{Pu}(n, f)$, $^{237}\text{Np}(n, f)$, $^{238}\text{U}(n, f)$, $^{47}\text{Ti}(n, p)^{47}\text{Sc}$, $^{58}\text{Ni}(n, p)^{58+58m}\text{Co}$, $^{32}\text{S}(n, p)^{32}\text{P}$, $^{54}\text{Fe}(n, p)^{54}\text{Mn}$, $^{24}\text{Mg}(n, p)^{24}\text{Na}$, $^{27}\text{Al}(n, \alpha)^{24}\text{Na}$, $^{203}\text{Tl}(n, 2n)^{202}\text{Tl}$, $^{93}\text{Nb}(n, 2n)^{92}\text{Nb}$. Детекторы облучали как в открытом виде, так и в кадмиевых экранах толщиной 1 мм, в составных экранах из кадмия и бора (1 мм Cd + 1 г/см² ^{10}B). Требование по периоду полураспада было обусловлено особенностью эксперимента — после облучения все детекторы в течение 2 сут доставляли автомобильным транспортом для обработки из ИАЭ НЯЦ Казахстана (г. Курчатов) в РФЯЦ — ВНИИТФ (г. Снежинск) на расстояние ~ 1800 км.

Активность облученных детекторов измеряли на образцовой γ -спектрометрической установке [7]. Диапазон измеряемой энергии γ -квантов от 60 кэВ до 3 МэВ. Детекторы на основе делящихся изотопов обрабатывали по методике твердотельных трековых детекторов. Погрешность определения активационных интегралов 3—5%, делительных — не хуже 4% (1σ).

Определение характеристик поля нейтронов. Для восстановления энергетических спектров нейтронов в диапазоне энергии от 0,6 эВ до 18 МэВ был использован алгоритм, разработанный на основе метода направленного расхождения [7]. В качестве начальных приближений были взяты спектры из библиотеки классифицированных нейтронных спектров БКС-2 [8]. Флюенс тепловых нейтронов рассчитывали по стандартным методикам реакторной дозиметрии [9].

Постановка экспериментов. Активационные и делящиеся детекторы облучали раздельно двумя пусками реактора в режиме регулируемых импульсов с энерговыделением 50 и 0,3 МДж соответственно. Детекторы устанавливали в центре и на высоте 70 см от него в центральном экспериментальном канале, там, где к уран-графитовому топливу активной зоны примыкает графитовый отражатель. Размеры пакетов активационных детекторов тепловых и резонансных нейтронов не превышали 10 мм по диаметру и 2 мм по толщине, пакетов с пороговыми детекторами — 20 и 6 мм соответственно. Погрешность установки детекторов по высоте составляла ± 1 см. Пакеты детекторов размещали по внутренней поверхности специального установочного кольца диаметром 7 см, поэтому расстояние от детекторов до оси канала составляло $3,5 \pm 0,5$ см. Угловое положение колец не фиксировали, так как ввиду аксиальной симметрии поля нейтронов для центрального канала это не имеет значения. Все трековые делящиеся детекторы устанавливали около оси экспериментального канала с погрешностью не более ± 2 см. Активационные и делящиеся детекторы сопровождали детекторами-мониторами из никеля.

Результаты восстановления спектров нейтронов. Расчетные и измеренные спектры нейтронов в 12-групповом представлении приведены в табл. 1. В графическом виде экспериментальный спектр нейтронов в центре канала приведен на рис. 2. Из табл. 1



Р и с. 2. Экспериментальный энергетический спектр нейтронов в центре экспериментального канала ИГР

видно, что спектр нейтронов действительно «смягчается» по высоте центрального канала относительно центра. Приращение доли тепловых нейтронов в спектре по мере удаления от центра активной зоны близко для расчета и эксперимента, хотя расчетные и экспериментальные доли заметно расходятся. Эти расхождения обусловлены несколькими причинами, во-первых, неполным соответствием между реальным и заданным в расчетах составом топлива активной зоны. Так, во ВНИИТФ измерено содержание природного бора только в графитовом блоке отражателя — оно составило $10^{-4}\%$, для блоков активной зоны надежных данных о содержании бора нет. По оценкам [10] содержание бора в топливных блоках колеблется в широких пределах и может достигать $10^{-3}\%$. В топливных блоках реактора-прототипа TREAT содержится до $10^{-4}\%$ бора и 0,1% железа. Скорее всего, наибольшее влияние на долю тепловых нейтронов в спектре должно оказать содержание бора и других примесей в центральной крестообразной графитовой втулке. Во-вторых, расхождение может быть обусловлено несоответствием материалов, из которых изготовлена конструкция центрального экспериментального канала реактора, и заданных в расчетах. Кроме того, в расчетной схеме отсутствуют детекторы внутризонного контроля, в конструкцию которых входят сталь, оксид магния и небольшое количество урана, нанесенное на электроды детекторов.

Расчет спектров проведен в предположении, что примесей бора в топливных блоках и центральной графитовой втулке нет, в конструкциях использованы только цирконий и алюминий, тогда как в составе циркония имеется ниобий, в алюминии (сплав АМ) должны быть в малом количестве (на уровне процентов или долей процента) примеси

Т а б л и ц а 1. Расчетная и экспериментальная доля нейтронов в спектре в центральном канале, %

№	E_k , МэВ	E_{k+1} , МэВ	Центр канала		Периферия канала	
			Расчет	Эксперимент	Расчет	Эксперимент
1	0	$0,6 \cdot 10^{-6}$	$48,3 \pm 0,8$	39,5	$51,9 \pm 1,0$	43,8
2	$0,6 \cdot 10^{-6}$	$1,0 \cdot 10^{-6}$	$1,8 \pm 0,1$	3,0	$1,6 \pm 0,1$	3,1
3	$1,0 \cdot 10^{-6}$	$1,0 \cdot 10^{-5}$	$7,6 \pm 0,2$	10,1	$7,0 \pm 0,2$	9,4
4	$1,0 \cdot 10^{-5}$	$1,0 \cdot 10^{-4}$	$7,8 \pm 0,2$	6,5	$7,4 \pm 0,3$	6,8
5	$1,0 \cdot 10^{-4}$	$1,0 \cdot 10^{-3}$	$6,9 \pm 0,2$	7,2	$6,9 \pm 0,2$	7,6
6	$1,0 \cdot 10^{-3}$	$1,0 \cdot 10^{-2}$	$7,2 \pm 0,2$	8,8	$6,5 \pm 0,2$	7,4
7	$1,0 \cdot 10^{-2}$	$1,0 \cdot 10^{-1}$	$6,5 \pm 0,2$	6,0	$6,0 \pm 0,2$	6,1
8	0,1	0,5	$5,6 \pm 0,2$	7,1	$5,1 \pm 0,2$	6,8
9	0,5	1	$3,4 \pm 0,2$	6,3	$2,6 \pm 0,2$	5,0
10	1	3	$3,9 \pm 0,2$	4,7	$4,2 \pm 0,2$	3,7
11	3	8	$1,0 \pm 0,2$	0,89	$0,7 \pm 0,1$	0,7
12	8	18	0	0,021	0	0,017
Средняя энергия нейтронов в диапазоне энергии больше 0,6 эВ, МэВ			—	0,309	—	0,268
Средняя энергия нейтронов по всему спектру, МэВ			—	0,152	—	0,112

меди, хрома, марганца и т.д. Надежно определить количество и точный состав всех примесей в настоящее время не представляется возможным, поэтому пока проведена лишь оценка их влияния. Для этого рассчитана доля тепловых нейтронов в спектре, и в одном расчете получены коррелированные результаты [11] для разного содержания бора в центральной графитовой втулке и разных примесей в конструкционных материалах. Результаты расчетов влияния некоторых примесей представлены в табл. 2. Видно, что влияние каждой отдельной примеси невелико, наибольшее влияние оказывают примеси природного бора.

Т а б л и ц а 2. Доля тепловых нейтронов до энергии 0,6 эВ в спектре центра канала при разном содержании бора в центральной графитовой втулке и примесей в конструкционных материалах, %

Примесь, %	Доля, %
Без примесей	$48,3 \pm 0,8$
Бор в центральной втулке:	
$5 \cdot 10^{-4}$	$47,9 \pm 0,8$
$7,5 \cdot 10^{-4}$	$48,4 \pm 0,8$
$1 \cdot 10^{-3}$	$48,2 \pm 0,8$
$2,5 \cdot 10^{-3}$	$46,5 \pm 0,8$
$5 \cdot 10^{-3}$	$46,1 \pm 0,8$
Конструкции из алюминия:	
медь 1	$47,1 \pm 0,5$
хром 1	$47,5 \pm 0,5$
марганец 1	$46,5 \pm 0,5$
Конструкции из циркония:	
ниобий 1	$47,0 \pm 0,5$

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