

СТАТЬИ

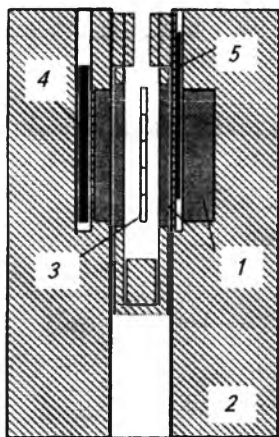
УДК 621.039.573

ОСОБЕННОСТИ ПОЛЯ ТЕПЛОВЫХ НЕЙТРОНОВ В ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОМ КАНАЛЕ ИГР

*Горин Н.В., Кандиев Я.З., Кашаева Е.А., Рукавишников Г.В., Садыков Н.Р.,
Шмаков Д.В., Щербина А.Н. (РФЯЦ — ВНИИТФ), Гайдайчук В.А.,
Казьмин Ю.М., Пахниц В.А., Скивка А.С. (ИАЭ НЯЦ Республики Казахстан),
Васильев А.П., Малинкин В.М. (НИКИЭТ),
Каминский А.С., Павшук В.А. (РНЦ «Курчатовский ин-т»)*

При облучении протяженных объектов, например, макетов твэлов или ТВС в центральном экспериментальном канале ИГР [1] необходимо знать особенности изменения функции распределения нейтронного потока по высоте канала в течение пуска. Облучают, как правило, или нерегулируемой самогасящейся вспышкой, или регулируемым импульсом. В режиме импульса в отличие от вспышки компенсируется потеря реактивности вследствие разогрева уран-графитового топлива активной зоны путем перемещения группы из восьми компенсирующих стержней по заранее заданному алгоритму. В режиме импульса с максимальным энерговыделением, когда топливо в центре активной зоны разогревается до ~ 1400 К и, следовательно, необходима максимальная компенсация потери реактивности, группа компенсирующих стержней перемещается на весь ход. Именно в этом режиме начинают играть заметную роль физические эффекты, не проявляющие себя в достаточной степени в режиме короткой $\sim 0,1$ — 1 с вспышки, в течение которой стержни не перемещаются. Так, в регулируемых импульсах, когда одновременно изменяются температура уран-графитового топлива и положение стержней управления, заметно меняется функция распределения нейтронного потока по высоте активной зоны. При комнатной температуре и введенных поглощающих стержнях, т.е. в условиях симметрии верхней и нижней половин активной зоны максимум распределения находится вблизи уровня центра. По мере роста температуры уран-графитового топлива и вывода поглощающих стержней из нижней половины активной зоны условия симметрии половин нарушаются, и максимум распределения нейтронного потока смещается вниз, в ту область, откуда удаляется поглощающий материал. При дальнейшем разогреве топлива и выводе стержней уже из верхней половины активной зоны реактора условия симметрии начинают восстанавливаться, и максимум распределения поднимается вверх, приближаясь к уровню центра.

В настоящей работе экспериментальное исследование перечисленных эффектов в импульсе проведено с помощью 5-секционного комптоновского эмиссионного детектора нейтронов с эмиттером из оксида гадолиния с длиной каждой чувствительной секции 260 мм и расстоянием между секциями 20 мм. Динамический диапазон работы детектора и его основные характеристики исследованы во всех режимах работы реактора в диапазоне изменения плотности потока тепловых нейтронов до $10^{17} \text{ с}^{-1} \cdot \text{см}^{-2}$ с длительностью импульса мощности от 0,1 с и более. Детектор безинерционен, его сигнал пропорционален плотности потока тепловых нейтронов, суммарная длина почти полностью перекрывает высоту активной зоны. Детектор установлен вдоль вертикальной оси экспериментального канала таким образом, что центральная секция располагается симметрично относительно центральной горизонтальной плоскости реактора. На рис. 1



Р и с. 1. Конфигурация активной зоны ИГР (водяной бак не показан): 1 — подвижная и неподвижная части кладки активной зоны реактора; 2 — масса отражателя; 3 — чувствительные секции 5-секционного детектора; 4 — уравнивательные стержни; 5 — стержни управления

пять чувствительных секций пронумерованы от № 1 до 5 в направлении сверху—вниз. Три уравнивательных стержня расположены в трех углах на периферии кладки реактора, 13 стержней управления — внутри кладки. В большинстве пусков уравнивательные стержни всегда полностью опущены, в управлении не участвуют и не нарушают симметрию верхней и нижней половин активной зоны, тогда как все остальные стержни участвуют в управлении и при пуске выводятся из активной зоны.

Основное достоинство эксперимента — непрерывность регистрации тока всех чувствительных секций детектора в течение пуска и, следовательно, возможность непрерывного наблюдения за поведением потока тепловых нейтронов по длине экспериментального канала во всем диапазоне изменения температуры топлива и положения стержней. При подготовке эксперимента наиболее важной была представительность результатов — можно ли исследовать функцию распределения для активной зоны реактора высотой 1400 мм детекторами длиной 260 мм каждый? Такая длина вряд ли может считаться «малой» по сравнению с высотой активной зоны, а распределение потока тепловых нейтронов на этой длине заведомо не постоянно, по крайней мере, вблизи границы активной зоны. Казалось бы, все это не позволит восстановить функцию распределения. Но ситуация существенно облегчается тем, что

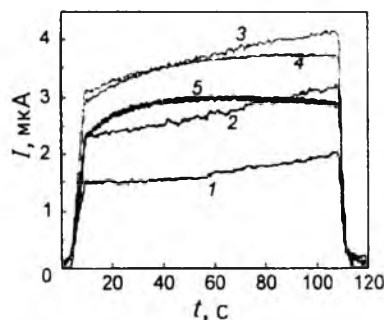
еще до начала эксперимента многое известно о распределении тепловых нейтронов по высоте. Оно должно описываться гладкой кривой и иметь только один максимум. Известно, что вблизи максимума на расстоянии около 15 см по обе стороны функция распределения изменяется слабо, не более чем на 10—15%. На границе она различная — в нижней части активной зоны больше. Отношение максимальной функции распределения к минимальной может достигать коэффициента 2—3. Эти допущения использованы при восстановлении функции распределения тепловых нейтронов по измеренным токам секций, которые, по сути, являются интегралом (с точностью до константы) искомой функции распределения на участках расположения чувствительных секций. Удалось предложить алгоритм обработки результатов измерений, что позволило объяснить процессы в активной зоне на качественном уровне и выполнить некоторые количественные оценки, связанные, главным образом, с поведением максимума распределения.

При калибровке детектор устанавливали в экспериментальном канале так, что каждая чувствительная секция последовательно занимала одно и то же место на уровне центра. При каждом положении генерировали примерно одинаковые по энерговыделению вспышки и регистрировали ток всех секций. Было установлено, что чувствительность секций, размещенных на уровне центра активной зоны, отличается одна от другой на 3—4%.

Эксперимент по измерению распределения потока тепловых нейтронов в режиме регулируемого импульса с максимальным энерговыделением проведен при работе реактора на постоянной мощности ~ 60 МВт в течение 105 с. В течение пуска изменяли положение группы компенсирующих стержней КС1—КС8, которые перемещались одновременно и синхронно, компенсируя потерю реактивности вследствие разогрева топлива. Мощностью реактора управляли по сигналам камер деления, расположенных в водяном баке. Они наиболее удалены от активной зоны и воспринимают ее «в целом» [2]. Были приняты меры для обеспечения в течение пуска осевой симметрии нейтронного поля в активной зоне. В эксперименте с погрешностью не более 2% измерен

ток каждой секции детектора. Значение $I_1—I_5$ будет определять вид искомой функции распределения. Если $I_1 = -I_5$, $I_2 = -I_4$, $I_3 = \max \{I_1, I_2, I_3, I_4, I_5\}$, то искомая функция должна быть симметричной и ее максимум располагаться вблизи уровня центра при $z = \sim 0$. Если $I_1 < I_5$ и $I_2 < I_3$, то функция несимметрична и ее максимум смещен вниз. Смещение тем больше, чем сильнее расхождение тока между секциями детектора.

Экспериментальная осциллограмма тока чувствительных секций представлена на рис. 2. В табл. 1 приведен относительный ток чувствительных секций, зарегистрированный для трех характерных конфигураций — в исходном состоянии, когда стержни управления максимально глубоко введены в активную зону, введены наполовину и в конце пуска, когда максимально выведены. За единицу принят ток секции № 3 при комнатной температуре топлива в начале эксперимента. В результаты табл. 1 внесены поправки на чувствительность секций при их расположении на уровне центра активной зоны, и полная относительная погрешность представленных экспериментальных результатов оценивается авторами на уровне 2—2,5%.



Р и с. 2. Осциллограмма тока чувствительных секций в пуске ИГР (номер кривой соответствует чувствительной секции)

Т а б л и ц а 1. Экспериментальный (числитель) и расчетный относительный ток (знаменатель) чувствительных секций детектора при разных положениях стержней и температуре топлива

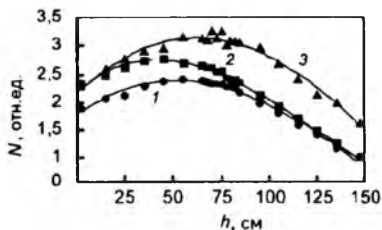
Секция	Температура топлива по термопаре колонны «г-9», К		
	300	550	1400
	Положение группы КС1—КС8, мм		
	1240	700	~ 100
I_1 , секция № 1, верх	0,51/0,54	0,54/0,54	0,71/0,80
I_2 , секция № 2	0,79/0,83	0,88/0,86	1,08/1,13
I_3 , секция № 3, середина	1/1	1,11/1,10	1,28/1,27
I_4 , секция № 4	1,02/1,04	1,21 /1,20	1,27/1,27
I_5 , секция № 5, низ	0,87/0,91	1,04/1,10	1,04/1,12

Из анализа результатов табл. 1 видно, что по мере разогрева уран-графитового топлива возрастает ток каждой секции, что объясняется эффектом просветления графита [3], но возрастание тока в течение пуска неравномерно. В исходном и конечном состояниях при 300 и 1400 К максимальный ток регистрирует центральная секция, и соотношение токов между соответствующими секциями в этих конфигурациях примерно одинаково. При 550 К и наполовину выведенных стержнях соотношение между токами секций нарушается. Ток верхней секции остался почти таким же, как и при 300 К, максимальное значение достигнуто уже не в секции № 3, а в секции № 4, при дальнейшем разогреве начинает возрастать ток секции № 1 и почти перестает изменяться ток секции № 5. Все это может быть объяснено следующим образом.

В начале пуска при комнатной температуре топлива группа стержней КС1—КС8 находится в положении 1240 мм и поглощающий материал присутствует как в нижней, так и в верхней половине активной зоны, в конце пуска при ~ 1400 К группа КС1—КС8 выведена из активной зоны и поглощающего материала почти нет ни в нижней, ни в верхней части. Поэтому в начале и конце пуска обе половины активной зоны симметричны и соответственно токи $I_1—I_5$ в начале и конце пуска подобны. При 550 К

стержни КС1—КС8 наполовину выведены из активной зоны и поглощающий материал имеется только в верхней половине активной зоны. В этой конфигурации происходит наиболее сильное возмущение поля нейтронов, что находит свое отражение в изменении соотношений токов. Анализ показывает, что максимум распределения при 550 К действительно должен сместиться вниз примерно на 15—20 см, соизмеримые с длиной чувствительной секции детектора.

По программе ПРИЗМА.Д [4] с системой констант БАС [5] разработки ВНИИТФ рассчитано распределение потока тепловых нейтронов по высоте центрального экспериментального канала для реальной конфигурации активной зоны и положений стержней, соответствующих 300, 550 и 1400 К. По оси центрального канала было расположено 20 небольших детекторов из гадолиния, и число захватов нейтронов гадолинием дает представление о функции распределения тепловых нейтронов по высоте канала. Погрешность расчета числа захватов в каждом детекторе составляет около 1%. Результаты расчета представлены на рис. 3. Видно, что положение максимума распределения тепловых нейтронов действительно изменяется в зависимости от положения стержней управления.



Р и с. 3. Распределение потока тепловых нейтронов по высоте экспериментального канала (от нижнего торца активной зоны) при температуре топлива 300 (1), 550 (2), 1400 К (3)

Если в исходном и конечном состоянии при 300 и 1400 К максимум распределения расположен ниже уровня центра примерно на 10 см, то при 550 К ниже уровня центра примерно на 30 см.

Результаты расчета совпадают с экспериментальными результатами с погрешностью до 10%. Так, интегрирование расчетных функций распределения тепловых нейтронов по участкам расположения чувствительных секций детектора позволяет получить значения, пропорциональные экспериментальным токам секций. Такие относительные расчетные токи секций представлены в табл. 1 вместе с экспериментальными данными. За единицу принят ток центральной секции при 300 К.

При анализе экспериментальных результатов следует учитывать, что доля тепловых нейтронов в спектре увеличивается на границе активной зоны, там, где к разогретому уран-графитовому топливу примыкает холодный графит отражателя [6]. Прежде всего это повлияет на чувствительность крайних секций детектора, и поэтому экспериментальная информация может быть использована для количественных оценок поведения максимума распределения и только для качественных оценок поведения всей функции распределения тепловых нейтронов.

Одновременно по мере разогрева уран-графитового топлива возрастает энергия тепловых нейтронов, находящихся в тепловом равновесии со средой. Наиболее сильно это происходит в центре активной зоны, где наиболее высока температура разогрева топлива [7], и гораздо слабее на границе, вблизи холодного графита отражателя. Понятие «тепловой нейтрон» в этих условиях становится неопределенным, так как в объеме активной зоны присутствуют тепловые нейтроны с разной энергией, потому что они находятся в тепловом равновесии с топливом разной температуры, в том числе с графитом отражателя, имеющим комнатную температуру. В одном и том же пуске по мере разогрева уран-графитового топлива энергия тепловых нейтронов будет изменяться в диапазоне 0,025—0,1 эВ, и это неизбежно повлияет на все характеристики реактора, связанные со спектром нейтронов. Понятие «распределение потока тепловых нейтронов» будет строгим только для начального состояния реактора, когда все уран-графитовое топливо имеет одинаковую комнатную температуру. Для тепловых нейтронов в центральном канале изменение спектра по мере разогрева топлива должно быть выражено слабее, так как нейтроны, вышедшие в полость канала, проходят через

центральную графитовую вставку и слой воды в конструкции неподвижной ампулы, температура которых не изменяется в течение пуска.

Высказанные предположения подтверждены расчетным путем. Для экспериментаторов, облучающих твэлы или ТВС в центральном канале ИГР, наибольший интерес представляют нейтроны, вызывающие акты делений и разогревающие исследуемые объекты. Поэтому по программе ПРИЗМА.Д для реальной конфигурации ИГР был вычислен спектр нейтронов, которые вызывают акты деления в объеме всей активной зоны и небольшом детекторе радиусом 1 мм из ^{235}U , расположенном в центре экспериментального канала. Температура уран-графитового топлива задавалась равной 300, 800 и 1300 К. Температура центральной графитовой вставки, воды в неподвижной ампуле центрального канала и графита отражателя была всегда 300 К. Результаты представлены в табл. 2. Видно, как по мере разогрева топлива меняется спектральный состав нейтронов в объеме активной зоны и не меняется (в пределах погрешности расчета) в полости экспериментального канала.

Т а б л и ц а 2. Доля нейтронов в спектре, которые вызывают акты деления в активной зоне и детекторе из ^{235}U , расположенном в центре экспериментального канала (в скобках приведена погрешность расчета, % (1σ)), %

E_n , эВ	Активная зона			Центр экспериментального канала		
	300 К	800 К	1300 К	300 К	800 К	1300 К
< 0,01	12,8(0,5)	4,7(1,4)	2,7(1,4)	14,6(3)	15,7(4)	15,9(3,6)
0,01—0,025	24,1(0,4)	11,1(0,8)	7,1(0,8)	16,3(1,5)	15,7(2,3)	15,6(2)
0,025—0,05	28,3(0,3)	18,9(0,6)	12,9(0,6)	24,8(1,1)	23,1(1,5)	22,6(1,1)
0,05—0,075	14,1(0,4)	15,0(0,7)	11,6(0,7)	16,1(1,1)	16,1(1,6)	15,6(1,1)
0,075—0,1	6,7(0,7)	11,1(0,9)	9,6(0,7)	10,1(1,3)	10,1(1,6)	9,8(1,1)
0,1—0,125	3,3(1)	8,2(1)	8,0(0,8)	5,7(1,3)	6,1(1,8)	6,1(1,3)
0,125—0,15	1,7(1,4)	6,1(1,2)	6,7(0,8)	3,3(1,5)	3,6(2,1)	3,7(1,5)
0,15—0,2	1,6(1,1)	7,9(1)	10,7(0,7)	3,2(1,5)	3,7(2)	3,9(1,4)
0,2—0,5	2,7(2)	11,6(0,8)	23,7(0,4)	2,9(1,5)	3,3(2)	4,3(1,2)
> 0,5	4,8(2,5)	5,5(2,5)	7,1(1,7)	3,1(1,5)	2,5(2,3)	2,4(1,7)

Таким образом, в объеме активной зоны ИГР и его экспериментальном канале присутствуют тепловые нейтроны с разной энергией, так как они находятся в тепловом равновесии с топливом разной температуры. Распределение тепловых нейтронов по высоте центрального экспериментального канала в течение пуска изменяется — при комнатной температуре максимум распределения находится вблизи центра активной зоны. По мере возрастания температуры топлива и вывода регулирующих стержней максимум распределения смещается вниз примерно на 15—20 см, затем при дальнейшем разогреве и выводе стержней приближается к исходному положению. При анализе экспериментальных результатов, постановке экспериментов, особенно облучении протяженных объектов, следует учитывать изменение поля нейтронов по высоте экспериментального канала.

Авторы благодарят руководство Института атомной энергии Национального ядерного центра Республики Казахстан за поддержку расчетно-экспериментальных работ по исследованию физических характеристик реактора ИГР, персонал реактора за проведение экспериментов и сотрудников математического отделения РФЯЦ — ВНИИТФ за проведение расчетов.

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. Эффект «просветления» уран-графитового топлива ИГР. — Там же, 1998, т. 85, вып. 5, с. 419—422.
4. 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, v. 7, № 3, p. 407—418.
5. 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.
6. Горин Н.В., Кандиев Я.З., Литвин В.И. и др. Расчетно-экспериментальное исследование особенностей спектра нейтронов ИГР. — Атомная энергия, 2000, т. 89, вып. 3, с. 233—237.
7. Горин Н.В., Кандиев Я.З., Садыкова М.О. и др. Расчетно-экспериментальное исследование температурного поля кладки ИГР. — Там же, 2000, т. 88, вып. 4, с. 247—251.

Поступила в Редакцию 29.12.2000

УДК 621.039.5

УЧЕТ СПЕКТРАЛЬНОЙ ИСТОРИИ ВЫГОРАНИЯ ТОПЛИВА ПРИ ПОДГОТОВКЕ НЕЙТРОННО-ФИЗИЧЕСКИХ КОНСТАНТ ТВС ВВЭР-1000

Батурин Д.М., Выговский С.Б. (МИФИ)

Современный уровень развития вычислительной техники не позволяет ученым и инженерам, занимающимся моделированием ядерных энергетических установок, проводить в широком масштабе нейтронно-физические расчеты с применением сложных моделей переноса нейтронов в больших гетерогенных системах. В первую очередь это относится к многовариантным проектным расчетам, моделированию динамических режимов при анализе безопасности реакторной установки. Можно говорить о том, что в настоящее время сложилась многоуровневая система моделирования нейтронно-физических процессов в ядерных реакторах. На начальном этапе рассчитываются плотность потока нейтронов и скорость реакций взаимодействия нейтронов с ядрами материалов отдельных конструктивных элементов активной зоны реактора с использованием методов Монте-Карло, вероятности первого столкновения. Результатом расчетов являются, в частности, средние по ячейке макросечения реакций в двухгрупповом диффузионном приближении.

Данное приближение является наиболее распространенным при моделировании активной зоны реакторов с водяным теплоносителем. Двухгрупповые макросечения деления, поглощения и рассеяния нейтронов, коэффициенты диффузии представляются в виде функций, зависящих от глубины выгорания топлива, плотности и температуры теплоносителя, температуры топлива и концентрации борной кислоты в теплоносителе. В настоящей статье приводятся результаты исследования влияния неопределенностей при моделировании выгорания топлива на двухгрупповые нейтронно-физические константы.

Обычно выгорание топлива моделируется при заданных номинальных теплофизических параметрах. Однако реально топливо, расположенное в различных частях реактора, выгорает при разных теплофизических параметрах, что связано с графиком нагрузок, неравномерностью поля энерговыделения, применением борного регулирования. На рис. 1 показано отклонение коэффициента размножения бесконечной решетки ТВС ВВЭР-1000 обогащением 4,4% по ^{235}U при отклонении разных теплофи-