

УДК 621.039.573

РАСЧЕТНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ ВРЕМЕНИ ЖИЗНИ НЕЙТРОНОВ ИГР

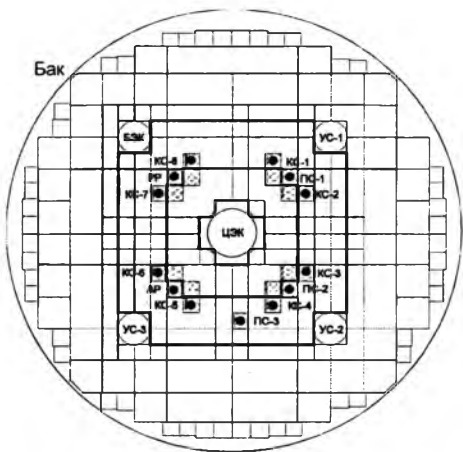
Горин Н.В., Кандиев Я.З., Кашаева Е.А., Щербина А.Н. (РФЯЦ — ВНИИТФ),
 Гайдайчук В.А., Демко Н.А., Казьмин Ю.М. (ИАЭ НЯЦ Республики Казахстан),
 Васильев А.П. (Межд. центр экол. безопасности Минатома РФ),
 Павшук В.А. (РНЦ «Курчатовский ин-т»)

При управлении ИГР и проведении расчетно-экспериментальных исследований в большинстве случаев его активную зону рассматривают в точечном приближении с постоянным временем жизни мгновенных нейтронов [1]. Однако для особо точных экспериментов и расчетов это допущение нуждается в уточнении. Так, разное и переменное количество поглощающего материала в нижней и верхней части активной зоны ИГР — оксида гадолиния, который находится в стержнях управления, влияет на поведение нейтронов, в том числе их время жизни. Наиболее слабое влияние будет в самой нижней части активной зоны вблизи нижнего отражателя, где поглощающего материала меньше всего, следствием чего должны наблюдаться особенности времени жизни нейтронов. Эти особенности должны усиливаться за счет влияния на спектр нейтронов холодного графита торцевых отражателей [2]. Специальных экспериментальных работ по исследованию особенностей времени жизни нейтронов не проводилось, но за время эксплуатации ИГР накоплены результаты, свидетельствующие о существовании такой зависимости. Их анализ стимулировал проведение настоящей работы.

В расчетах по программе ПРИЗМА.Д [3] с системой констант БАС [4] задана реальная конфигурация активной зоны ИГР — она имеет форму, близкую к кубу со стороной 1,4 м, и составлена из графитовых и уран-графитовых колонн. Активная зона окружена графитовым отражателем и водяной защитой. В кладке заданы реальные зазоры между колоннами, все технологические каналы, колонны со стержнями управления. В центральном и боковом экспериментальных каналах заданы конструкции со слоями воды для защиты облучаемых образцов от разогрева. Всего

в активной зоне 147 уран-графитовых и 21 графитовая колонна, одна крестообразная графитовая вставка с конструкцией центрального экспериментального канала, 16 графитовых колонн отражателя, 16 регулирующих стержней и водяной бак.

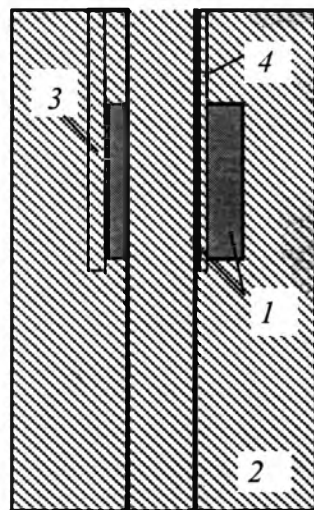
На рис. 1 представлено горизонтальное сечение кладки ИГР и показано положение колонн со стержнями управления и водяной бак. Штриховкой обозначены колонны внутри кладки без пропитки ураном. На рис. 2 представлена подвижная и неподвижная части кладки активной зоны 1, конфигурация отражателя 2, один из трех уравнивающих стержней 3, расположенных в трех углах на



периферии кладки реактора, и один из 13 стержней 4, находящийся внутри кладки. В большинстве пусков уравнительные стержни всегда 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 поднимаются вверх и выводятся из активной зоны. Подъем стержней означает перенос поглощающего материала из нижней части активной зоны в область верхнего отражателя. Поэтому нейтроны, родившиеся и прошедшие свой жизненный цикл в самых нижних слоях реактора, где количество поглощающего материала минимально, должны иметь большее время жизни по сравнению с всеми остальными нейтронами. На время жизни нейтронов влияет температура топлива [5, 6]. Обусловлено это тем, что примерно 40% нейтронов ИГР тепловые [2] и находятся в тепловом равновесии с топливом, температура которого в пуске может изменяться от 300 до 1400 К и в несколько раз увеличивать среднюю энергию тепловых нейтронов. Это, в свою очередь, должно приводить к уменьшению их времени жизни за счет увеличения утечки из активной зоны.

В расчетах заданы реальный состав топливных блоков и материала стержней управления, переменное распределение концентрации урана по высоте и радиусу активной зоны. Стержни КС1—КС8 расположены на уровне 1240 мм, стержни УС1—УС3 введены, стержни АР и ПС2 выведены, ПС1 и ПС3 выведены примерно наполовину. Материал стержней — графит с добавкой Gd_2O_3 (4%). Полный ход стержней 1400 мм. В такой конфигурации активная зона находится в критическом состоянии при комнатной температуре и расчетным путем исследованы характеристики нейтронов, родившихся в ее различных частях. Для этого активная зона разделена по высоте на 11 слоев — 9 слоев толщиной по 14,8 см и 2 самых крайних слоя (нижний и верхний) по 6,55 см. Границы слоев и результаты расчета времени жизни представлены в табл. 1. В скобках указана погрешность расчета (1σ , %). При таком разбиении в нижнем торцевом отражателе и самом нижнем слое № 1 нет поглощающего материала, в слое № 2 его меньше, чем в вышележащих слоях. Во всех остальных слоях разбиения и в верхнем торцевом отражателе поглощающий материал присутствует.

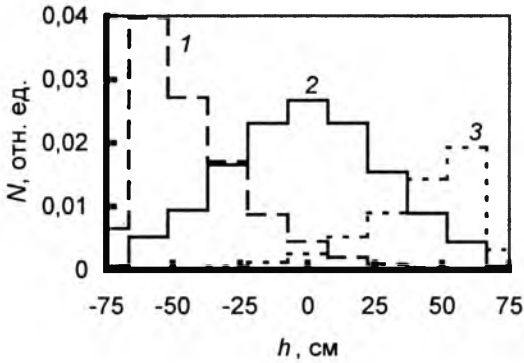
Вычислено число делений в i -м слое ($i = 1—11$) от нейтронов, родившихся в j -м слое ($j = 1—11$). На рис. 3 показано распределение числа делений по слоям от нейтронов, родившихся в слое № 2 (кривая 1) в нижней части активной зоны, в среднем слое № 6 (кривая 2) и в слое № 10 (кривая 3) в верхней части активной зоны. Видно, что нейтроны, в основном, вызывают акты деления либо в том слое, где они родились, либо в соседнем. Вклад нейтронов, родившихся в одинаковых по толщине слоях № 2, 6 и 10, в общее число делений в объеме активной зоны составляет 10,7, 13,4 и 5,5% соответственно. Эта асимметрия обусловлена как положением стержней, так и неравномерным распределением урана по высоте активной зоны. По мере удаления от места рождения вклад нейтронов в общее число делений



Р и с. 2. Вертикальное сечение ИГР (водяной бак не показан)

Таблица 1. Расчетное время жизни нейтронов, родившихся в разных слоях активной зоны, мс

Номер слоя	Размеры слоя по высоте, см	Со всеми стержнями	Без 13 стержней управления
1	-73,15—-66,6	1,308 (5,6)	1,372 (12)
2	-66,6—-51,8	1,193 (2,4)	1,229 (4,2)
3	-51,8—-37	0,920 (2,4)	0,983 (4)
4	-37—-22,2	0,801 (2,3)	0,843 (3,7)
5	-22,2—-7,4	0,737 (2,2)	0,838 (3,5)
6	-7,4—7,4	0,707 (2,2)	0,814 (3,4)
7	7,4—22,2	0,717 (2,2)	0,821 (3,5)
8	22,2—37	0,720 (2,4)	0,858 (3,7)
9	37—51,8	0,768 (2,7)	0,954 (4,2)
10	51,8—66,6	0,876 (3)	1,151 (4,9)
11	66,6—73,15	0,877 (7,5)	1,262 (12)
Среднее время жизни, мс		0,83 (0,5)	0,93 (0,9)



Р и с. 3. Распределение числа делений по слоям от нейтронов, родившихся в разных местах активной зоны

шее время жизни. Для сравнения проведен аналогичный расчет для той же конфигурации активной зоны с тремя введенными стержнями УС1—УС3 в углах кладки, но без остальных 13 стержней управления. Сравнение результатов расчетов для двух конфигураций — со всеми стержнями и без 13 (т.е. без поглощающего материала) позволяет выявить влияние на время жизни нейтронов находящегося в них поглотителя. Видно, что время жизни нейтронов для реальной конфигурации с полным комплектом поглощающих стержней на 10% меньше, чем для гипотетической конфигурации без стержней. В реальной конфигурации время жизни минимально и одинаково (в пределах погрешности расчета) для нейтронов, родившихся во внутренних слоях № 4—9 активной зоны, и возрастает для нейтронов, родившихся на ее границе. Время жизни нейтронов в самом нижнем слое активной зоны примерно на 70—80% выше, чем во внутренних слоях. Причина такого различия связана с захватом нейтронов материалом стержней, что приводит к уменьшению времени жизни. Поглощающий материал стержней при пуске реактора всегда присутствует в крайнем верхнем слое активной зоны и прилегающем к нему слое отражателя, но поглотителя нет в крайнем нижнем слое.

заметно уменьшается. Отсюда следует, что нейтроны при замедлении и миграции в активной зоне смещаются от места рождения в пределах 20—30 см. Отметим разницу в числе делений в симметричных слоях № 2 и 10 — вдвое большее число делений происходит в слое № 2, где при заданном положении стержней управления нет поглощающего материала.

Одновременно проведен расчет времени жизни нейтронов, родившихся в каждом из 11 слоев, и результирующее

Следует отметить влияние торцевых отражателей на время жизни нейтронов. По результатам табл. 1 видно, что время жизни нейтронов, родившихся и прошедших свой жизненный цикл в крайних слоях реактора (№ 1, 2, 10 и 11) и близлежащем графите отражателя без урана, заметно больше, чем нейтронов внутренних слоев.

Для выяснения роли отражателя и водяного бака, а также влияния температуры на время жизни нейтронов были проведены расчеты для упрощенной модели активной зоны ИГР в виде монолитного куба со стороной 140 см из уран-графитового топлива без центрального канала и стержней. В одной серии расчетов куб расположен в пустоте, в другой он со всех сторон окружен графитом, толщина которого последовательно увеличивалась — 20, 35 и 50 см, затем добавлялся слой воды толщиной 80 см, макетирующий водяной бак. Для оценки его влияния в одном из расчетов этот слой воды был заменен на слой графита. Вычисления проведены для температуры топлива 300 и 1000 К. Анализ табл. 2 показывает, что отражатель и вода бака вносят существенный вклад в формирование времени жизни нейтронов. Так, «средний» нейтрон ИГР большую часть времени находится в отражателе, перелетая 3—4 раза из активной зоны в отражатель. Можно проследить, как увеличение толщины графитового отражателя повышает время жизни нейтронов, число их перелетов из активной зоны в отражатель и обратно, $K_{эф}$ и как прекращает рост этих величин вода. Расчеты показали, что разогрев отражателя оказывает более слабое влияние на характеристики, чем нагрев активной зоны.

При уточнении физических характеристик ИГР в экспериментах 1991 г. генерировали последовательные вспышки без расхолаживания реактора, т.е. в условиях, когда температура активной зоны от вспышки к вспышке увеличивалась. Для каждой вспышки реализованная избыточная реактивность и период разгона связаны соотношением «обратных часов» с учетом влияния запаздывающих нейтронов. Эти эксперименты позволили оценить время жизни нейтронов при той температуре, которую имело топливо активной зоны перед формированием колокола вспышки. Погрешность измерений в экспериментах 1991 г. составляла примерно 10%, и было показано, что в пределах погрешности время жизни нейтронов не изменяется по мере роста температуры активной зоны до 1100 К. Для компенсации потери реактивности при таких уровнях разогрева группа компенсирующих стержней КС1—КС8 выводилась из активной зоны на полный ход. При этом масса поглощающего материала в объеме активной зоны становилась минимальной, что в соответствии с расчетами должно увеличивать время жизни нейтронов примерно на 10%. Незменность времени жизни в эксперименте означает, что из-за роста температуры время жизни уменьшается на те же 10%, компенсируя его увеличение.

Таким образом, исследования показывают, что представление активной зоны реактора в виде «точки» не всегда справедливо, время жизни нейтрона не является константой, оно зависит от места рождения нейтрона в активной зоне и на него сильное влияние оказывает поглощающий материал стержней управления и температура близлежащего уран-графитового топлива, в тепловом равновесии с которым находятся нейтроны. При анализе экспериментальных результатов, постановке экспериментов, особенно облучении протяженных объектов, следует с осторожностью использовать «точечное» представление активной зоны ИГР с неизменными характеристиками и при необходимости учитывать изменение времени жизни нейтронов по высоте экспериментального канала по мере перемещения стержней и разогрева уран-графитового топлива.

Т а б л и ц а 2. Параметры упрощенного ИГР в зависимости от температуры и характеристик отражателя

Характеристики	Куб топлива в пустоте		Куб топлива в отражателе из графита температурой 300 К											
			Слой отражателя 50—130 см											
			Графит								Вода			
			Температура топлива, К											
	300 К	1000 К	300				1000							
Толщина отражателя, см	—	—	20	35	50	130	20	35	50	130	20	35	50	130
$K_{эф}$	1,062 (0,13)	0,942 (0,2)	1,20 (0,08)	1,27 (0,06)	1,31 (0,06)	1,39 (0,05)	1,085 (0,12)	1,153 (0,1)	1,197 (0,09)	1,277 (0,07)	1,203 (0,08)	1,269 (0,06)	1,312 (0,05)	1,346 (0,05)
l , мс	0,53 (0,2)	0,432 (0,3)	0,666 (0,13)	0,814 (0,12)	0,998 (0,11)	1,9 (0,14)	0,568 (0,19)	0,725 (0,17)	0,923 (0,17)	1,894 (0,2)	0,664 (0,13)	0,81 (0,11)	0,995 (0,11)	1,244 (0,12)
Число столкновений нейтрона:														
в активной зоне	380 (0,1)	514 (0,16)	407 (0,07)	414 (0,06)	417 (0,05)	423 (0,05)	562 (0,1)	579 (0,09)	589 (0,08)	607 (0,07)	406,4 (0,06)	413,6 (0,05)	417,2 (0,05)	420 (0,05)
в отражателе	—	—	44,1 (0,15)	114,4 (0,15)	209,6 (0,15)	829 (0,15)	66,2 (0,2)	180 (0,2)	337 (0,2)	1376 (0,2)	44 (0,15)	114,3 (0,15)	209,4 (0,15)	588,8 (0,15)
Число вылетов:														
из активной зоны	0,99 (0,14)	1,12 (0,2)	3,06 (0,12)	3,9 (0,1)	4,4 (0,09)	5,21 (0,08)	3,58 (0,17)	4,62 (0,14)	5,26 (0,13)	6,32 (0,1)	3,06 (0,12)	3,9 (0,1)	4,4 (0,1)	4,77 (0,09)
из системы	0,99 (0,14)	1,12 (0,2)	0,796 (0,12)	0,695 (0,11)	0,614 (0,11)	0,325 (0,15)	0,922 (0,15)	0,812 (0,14)	0,722 (0,14)	0,386 (0,16)	0,798 (0,12)	0,696 (0,11)	0,615 (0,1)	<10 ⁻⁵ (14)

Авторы благодарят руководство Института атомной энергии Национального ядерного центра Республики Казахстан за поддержку расчетно-экспериментальных работ для ИГР. Работа выполнена при поддержке РФФИ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Курчатov 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. Горин Н.В., Кандиев Я.З., Литвин В.И. и др. Расчетно-экспериментальное исследование особенностей спектра нейтронов ИГР. — Там же, 2000, т. 89, вып. 3, с. 233—237.
3. 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.
4. Vasilyev A.P., Kuropatenko E.S., Lyutov V.D., Orlov A.I. Nuclear data library BAS. The history of development and validation for criticality safety calculations. — In: ICNC'95. Proc. of the Intern. Conf. of Nuclear Criticality Safety. Albuquerque, New Mexico, USA, September 17—21, 1995, p. 2.56—2.60.
5. Горин Н.В., Кандиев Я.З., Садыкова М.О. и др. Расчетно-экспериментальное исследование температурного поля кладки ИГР. — Атомная энергия, 2000, т. 88, вып. 4, с. 247—251.
6. Горин Н.В., Кандиев Я.З., Кашаева Е.А. и др. Особенности поля тепловых нейтронов в экспериментальном канале ИГР. — Там же, 2001, т. 90, вып. 4, с. 251—256.

Поступила в Редакцию 20.06.03

УДК 621.039.548

ПОВЕДЕНИЕ РЕАКТИВНОСТИ ПРИ ПУСКЕ РБМК

Подлазов Л.Н., Чичулин Н.Л. (НИКИЭТ)

Первым этапом пуска РБМК является его вывод в критическое состояние последовательным извлечением стержней СУЗ. Координаты и число извлекаемых стержней определяются заранее расчетным путем с помощью специальных штатных программ [1]. Обычно для достижения критического состояния требуется извлечь 80—90 стержней.

Критерии поиска пусковой последовательности стержней могут быть различными, но цель поиска одна — достижение критического состояния таким образом, чтобы в течение всего процесса вывода пространственное распределение нейтронного поля по активной зоне реактора не имело сильной неравномерности. Численно это выражается в минимизации коэффициента неравномерности энерговыделения по радиусу — в ходе извлечения стержней должно выполняться неравенство $K_r \leq 3,5$. Это достигается извлечением стержней, находящихся в районе текущего минимума энерговыделения в плане активной зоны с возможным наложением дополнительных ограничений. Ими могут быть, например, ограничения на расположение последовательно извлекаемых стержней или расстояние между ними.

Обозначим $\Delta\rho$ изменение реактивности реактора при извлечении стержня СУЗ. Среднее изменение реактивности реактора при извлечении одного стержня СУЗ $\Delta\rho_{\text{ср}}$, определенное как отношение изменения реактивности при извлечении всех стержней к их общему числу, обычно находится в диапазоне 0,07—0,1 $\beta_{\text{эф}}$.