

УДК 621.039.573

РАСЧЕТНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ФИЗИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В ИГР ПО ПРОГРАММЕ ПРИЗМА.Д

*Горин Н.В., Кандиев Я.З. (ВНИИТФ), Казьмин Ю.М.
(ИАЭ Национального ядерного центра Казахстана)*

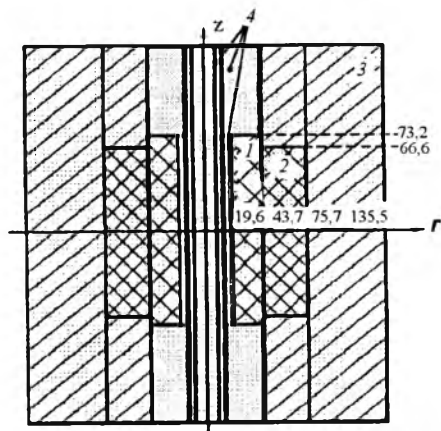
ВНИИТФ совместно с РНЦ «Курчатовский институт», НИКИЭТом и ИАЭ НЯЦ Казахстана разрабатывает многоканальный импульсный графитовый реактор МИГР [1], предназначенный для исследований безопасности энергетических реакторов. Для надежного обоснования его физических характеристик и режимов работы необходим большой объем исследований на реакторе-прототипе ИГР [2]. Основной объем исследований проводится расчетным путем с экспериментальной проверкой наиболее важных результатов. В настоящей работе на примере одного из экспериментов показана возможность расчетного исследования физических процессов, происходящих в активной зоне импульсного уран-графитового реактора ИГР. Расчеты проведены по программе ПРИЗМА.Д [3] с использованием коррелированных результатов в многовариантных расчетах.

В эксперименте сливали водный раствор борной кислоты из ампулы, расположенной в центральном экспериментальном канале, с одновременным поддержанием реактора на постоянной мощности. Экспериментально измеряли только ток нескольких малогабаритных камер деления, расположенных вдоль поверхности ампулы, которые давали информацию об изменении нейтронного поля в центральном канале. Однако для понимания происходящих процессов необходимо было знать изменение функций распределения числа делений по объему активной зоны, спектрального состава нейтронов в разных местах канала, связь между мощностью реактора и флюенсом нейтронов в месте установки камер деления и др. Недостающая информация была получена расчетным путем. Для объяснения физических процессов в эксперименте следовало рассчитать характеристики нейтронного поля центрального канала при разном уровне борной кислоты в ампуле, разных материалах ампулы, а также самого реактора. Всего необходимо было провести расчеты примерно для 50 вариантов и обнаружить расчетным путем относительно небольшие эффекты изменения нейтронного поля, начиная от долей и до 10—20%. Возможны были два способа постановки работы — либо проводить несколько десятков независимых расчетов, каждый из которых соответствовал только одному уровню борной кислоты в ампуле и только одному материалу ампулы (при таком способе необходимо было получать результаты с высокой точностью, что в свою очередь требовало больших затрат времени счета), либо провести только один расчет и получить в нем коррелированные результаты для всех вариантов задачи.

Расчеты проведены вторым способом по программе ПРИЗМА.Д. Предварительно программа с библиотекой нейтронных констант БАС [4] была верифицирована [5—7] по $K_{эф}$ для разных конфигураций и разной температуры активной зоны ИГР, распределению флюенса нейтронов, изменению нейтронного поля, показана возможность ее использования для прогноза возмущений в трехмерном распределении нейтронного поля по центральному каналу.

Постановка эксперимента. В центральный экспериментальный канал реактора была установлена ампула, заполненная водным раствором борной кислоты (H_3BO_3) концентрацией 18,2 г/л. Объем заливаемого в ампулу поглотителя 5,5 л, начальная высота столба поглотителя 1 м. Геометрический центр ампулы был совмещен с геометрическим центром активной зоны. Вдоль ампулы было установлено несколько малогабаритных камер деления. Реактор выводили на постоянный уровень мощности, затем снизу ампулы открывали клапан и сливали раствор. В течение эксперимента мощность реактора поддерживали неизменной. Изменения нейтронного поля и, следовательно, тока камер были невелики и в максимуме не превышали 15—25%.

Конфигурация активной зоны ИГР (рис. 1). В расчетах использована упрощенная конфигурация ИГР. Кубическая форма активной зоны заменена цилиндрической с осевой симметрией, отсутствует блочная структура кладки, нет стержней управления и водяного бака. Для понимания физических процессов в ИГР такие упрощения, скорее всего, допустимы. Конструкция неподвижной ампулы представляет собой чередующиеся слои алюминия, воды и циркония. В канал помещена ампула внутренним



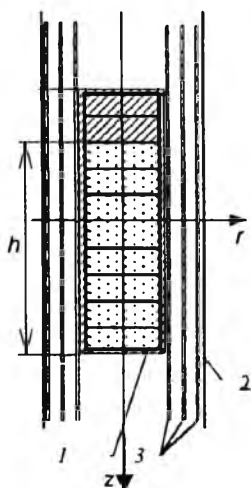
Р и с. 1. Расчетная конфигурация активной зоны ИГР: 1, 2 — подвижная и неподвижная части кладки; 3 — графитовый отражатель; 4 — центральный канал и неподвижная ампула (все размеры приведены в см)

диаметром полости 8,4 см, высотой полости 100 см (рис. 2). Рассмотрены три варианта состава стенок ампулы — железо, алюминий и вакуум, т.е. расчет проведен для ампулы без дна и стенок. Расчет для различного материала иллюстрирует его роль в поглощении тепловых нейтронов в канале. Уровень раствора отсчитывается от дна ампулы. Рассмотрены два варианта заполнения ампулы — раствором борной кислоты или водой. Между наружной поверхностью ампулы и внутренней канала расположены три цилиндра высотой по 150 см, заполненные ^{235}U плотностью

0,01 г/см³. Каждый цилиндр разделен по высоте на 30 областей по 5 см каждая. Внутренний и внешний радиус цилиндров 4,5—4,6, 7,05—7,15, 11,3—11,4 см соответственно. Цилиндры не влияют на характеристики нейтронного поля и, по сути, являются индикаторами нейтронного поля в канале. Каждый цилиндрический слой высотой по 5 см (в условиях осевой симметрии для расчетной конфигурации активной зоны) моделирует малогабаритную камеру деления. Далее по тексту каждый 5-сантиметровый цилиндр назван индикатором. Индикатор

№ 1 — самый верхний, стык индикаторов №15 и 16 находится на уровне центра активной зоны, индикатор № 30 — самый нижний. При сливе раствор борной кислоты перемещается мимо индикаторов с № 5 до 26. В расчетах раствор борной кислоты в ампуле уменьшался ступенчато по 10 см, при этом за один шаг поверхность раствора проходила мимо двух соседних индикаторов.

Описание программы. Особенностью программы ПРИЗМА.Д, созданной для решения реакторных задач, является наличие специального источника — точек деления, распределенных по собственной функции в активной зоне реактора. В зависимости от условий задачи источник может испускать нейтроны и фотоны делительного спектра или только нейтроны делительного спектра.



Р и с. 2. Расположение урановых цилиндров-индикаторов в канале относительно ампулы: 1 — раствор борной кислоты; 2 — внутренняя поверхность канала; 3 — цилиндры-индикаторы

Для уменьшения ограничений по применению неаналогового моделирования процессы получения источника и процесс моделирования траекторий для достижения необходимых результатов разделены. Такая организация счетного цикла позволяет без ограничений применять неаналоговый способ моделирования во второй части этого цикла. В частности, использование схем неаналогового моделирования даст возможность существенно повысить эффективность расчетов, которые связаны с оценкой событий, имеющих малую вероятность.

В комплексе ПРИЗМА реализован специальный способ моделирования траекторий, основанный на пометке частицы и позволяющий получать в одном расчете коррелированные результаты нескольких вариантов задачи, которые отличаются относительно малыми изменениями в локальной области системы. Имеются три типа задач:

— варианты с меняющимся составом. Они отличаются составом вещества, заполняющего некоторый объем V ;

— варианты с нарастающим объемом V . Размеры объема меняются по правилу $V(1) = V_1$, $V(2) = V_1 + V_2$, ..., $V(k) = V_1 + V_2 + \dots + V_k$;

— варианты с перемещающимся объемом. Они отличаются тем, что объем $V(i)$, $i = 1, \dots, k$ помещается в разные места системы.

В таких задачах можно выделить три сорта траекторий — не пересекающих зону возмущения (они являются общими для всех вариантов задачи и составляют большую часть всех траекторий), имеющих общую часть для всех вариантов задачи до тех пор, пока частица не попадет в зону возмущения, различающихся от начала и до конца для всех вариантов (число таких траекторий незначительно).

Суть способа моделирования заключается в следующем: каждому варианту задачи соответствует свой тип метки (частица источника имеет все метки), при попадании в возмущенный объем частица расщепляется на две — одна продолжает блуждание в геометрии, отвечающей варианту с возмущенным объемом с меткой, соответствующей этому варианту, другая — в геометрии, отвечающей варианту с невозмущенным объемом с соответствующей меткой. Такой способ моделирования позволяет строить общие для всех вариантов части траекторий только один раз, что, во-первых, экономит время счета и, во-вторых, даст положительно коррелированные результаты.

В программе ПРИЗМА.Д этот способ реализован с учетом специфики источника. Для всех вариантов задачи в качестве источника берутся точки делений в активной зоне для варианта без возмущений. В случаях, когда влияние возмущений на распределение точек делений пренебрежимо мало, используется расчетная схема с неизменным распределением точек делений. Когда необходимо учитывать влияние возмущений на распределение точек делений, используется схема «малых итераций по делениям», которая реализована во второй части счетного цикла.

В качестве источника рассматриваются точки деления, полученные для i -го шага ($1 \leq i \leq 4$) моделирования. Точки деления для первого шага — это точки, полученные в первой части счетного цикла. Результаты, полученные на i -м шаге, нормируются на n_i — число делений для i -го шага. Например, если n_{i+1} — точки делений, полученные на i -м шаге, то n_{i+1}/n_i — несмещенная оценка $K_{эф}$. Таким образом, задавая число малых итераций N ($1 \leq N \leq 4$), можно учесть влияние возмущений на распределение точек делений источника для каждого варианта задачи. Число N выбирается пользователем в зависимости от степени влияния возмущений.

Организация расчетов. Проведены три серии расчетов, в каждой число малых итераций $N = 2$. Этого достаточно, так как возмущения, вносимые ампулой, относительно невелики.

1. Расчет влияния материала и заполнения ампулы на характеристики активной зоны. Всего в одном расчете получены результаты для девяти вариантов — рассмотрены ампулы, изготовленные или из железа, или алюминия, или задан гипотетический слу-

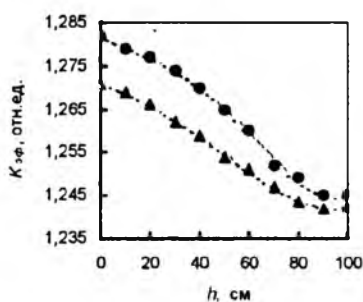
чай отсутствия стенок у ампулы. Для каждого из этих вариантов — ампула либо пустая, либо заполнена водой, либо раствором борной кислоты.

2. Расчет нейтронно-физических характеристик только активной зоны — спектра нейтронов, вызывающих акты деления, $K_{эф}$, времени жизни нейтронов, функций распределения чисел делений по высоте и радиусу активной зоны. Всего в одном расчете получены результаты для 22 вариантов — две вариации для материалов стенки ампулы (железо или алюминий, случай с меняющимся составом) и 11 вариаций для степени заполнения, когда высота раствора борной кислоты в ампуле уменьшалась от 100 до 0 см шагами по 10 см (случай с нарастающим объемом).

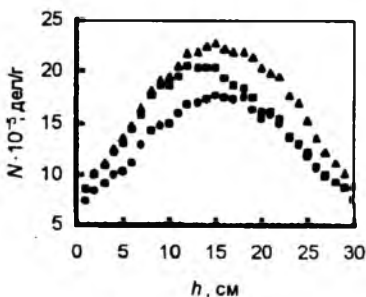
3. Расчет нейтронного поля в центральном канале при сливе раствора борной кислоты — $K_{эф}$, спектр нейтронов, попадающих в объем индикаторов, флюенс нейтронов и среднее число делений в 90 индикаторах, поглощение нейтронов ампулой и раствором, изменение в числах делений в каждом из трех урановых цилиндров при разных уровнях раствора в ампуле относительно варианта с полностью заполненной ампулой. Всего в одном расчете получены результаты для 22 вариантов.

Результаты для одной и той же конфигурации, но полученные в разных сериях будут совпадать только в пределах погрешности, и это учитывалось при анализе результатов.

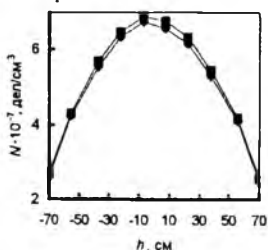
Результаты расчетов. Приведем некоторые результаты, иллюстрирующие способность расчетной методики правильно прогнозировать физические эффекты в реакторе и обнаруживать небольшие изменения его характеристик (рис. 3—6). На рис. 3 через расчетные точки проведены две гладкие кривые, которые показывают влияние материала ампулы и массы раствора на $K_{эф}$ — для пустых ампул разница в $K_{эф}$ определяется



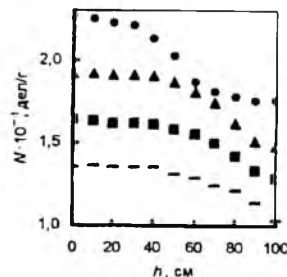
Р и с. 3. Изменение $K_{эф}$ в зависимости от уровня раствора в алюминиевой (●) и железной ампуле (▲)



Р и с. 5. Распределение числа делений в индикаторах при полностью заполненной ампуле (●), заполненной наполовину (■) и пустой (▲)



Р и с. 4. Распределение числа делений по высоте активной зоны ИГР: ■, ◆ — полная и пустая ампула соответственно

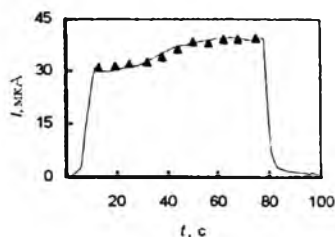


Р и с. 6. Расчетные точки изменения числа делений в индикаторах при сливе борной кислоты из алюминиевой ампулы: ●, ▲, ■, — индикатор расположен на уровне центра ампулы, 30, 40 и 50 см вниз от уровня центра соответственно

разными поглощающими свойствами железа и алюминия, для заполненных ампул основное влияние оказывают поглощающие свойства раствора борной кислоты. На рис. 4 видно, что распределение числа делений по высоте активной зоны реактора почти не зависит от уровня раствора в ампуле и от материала ампулы. На рис. 5 показаны три массива расчетных точек и видно, что распределение числа делений в индикаторах для полной и пустой ампулы симметрично относительно геометрического центра активной зоны, тогда как для полузаполненной ампулы максимум распределения смещен. Распределение числа делений в индикаторах для полузаполненной ампулы в верхней части активной зоны совпадает с распределением для пустой ампулы, в нижней части — для

полной. Наибольшая площадь под кривой распределения числа делений по высоте соответствует пустой ампуле, затем ампуле, заполненной поглотителем наполовину, и минимальная площадь под кривой получена для полной ампулы. По изменению числа делений в индикаторах, расположенных вдоль ампулы, можно проследить реакцию индикатора на слив борной кислоты. На рис. 6 представлены только расчетные точки и видно резкое изменение сигнала камеры деления, расположенной на уровне центра ампулы, и последовательно уменьшающееся по амплитуде и смещенное по времени изменение сигнала индикаторов, расположенных в нижней части ампулы.

Экспериментальное изменение тока камеры при сливе раствора согласуется с расчетными результатами (рис. 7). Они нанесены на экспериментальные осциллограммы в предположении, что раствор равномерно сливался из ампулы в течение эксперимента. При наложении расчетных точек на осциллограмму учтена паспортная чувствительность конкретной камеры и мощность реактора в пуске. Расчеты и эксперимент показывают, что существует относительно резкое изменение тока камеры при прохождении поверхности раствора мимо камеры деления.



Р и с. 7. Экспериментальная осциллограмма сигнала камеры деления, расположенной у боковой поверхности ампулы при сливе раствора борной кислоты, и расчетные точки

Анализ эффективности расчетов. Проведено сравнение эффективности расчета изменений числа делений во внутреннем цилиндре для независимых и многовариантного расчета № 3 при разном уровне заполнения алюминиевой ампулы борной кислотой. Независимые расчеты проведены для пяти уровней заполнения — 100, 90, 80, 50 и 0 см (см. таблицу). Вычислена повариантная зависимость относительной эффективности многовариантного расчета по сравнению с независимыми расчетами — она равна 230, когда изменения нейтронного поля составляют несколько процентов, и уменьшается до 30, когда изменение достигает 20%. Средняя относительная эффективность всего многовариантного расчета около 90.

Изменения чисел делений во внутреннем цилиндре относительно заполненной ампулы, дел./г

Уровень заполнения ампулы, см	Коррелированные результаты		Независимые результаты		Относительная эффективность многовариантного расчета
	Число делений на 1 г, 10^{-6}	Погрешность (σ), %	Число делений на 1 г, 10^{-6}	Погрешность (σ), %	
90	2,23	8,2	3,97	84	232
80	5,28	4,5	6,65	35	131,9
50	17,1	2,3	19,4	11,3	51,7
0	36,6	1,6	42,1	5,6	27,6

Примечание. Продолжительность счета многовариантной задачи 40 ч, каждого варианта при независимых расчетах — 4 ч.

Таким образом, методика расчетов, по которой в одном расчетном задании получают коррелированные результаты для многих конфигураций, позволяет надежно прогнозировать небольшие экспериментальные эффекты, начиная от долей процентов. Для рассмотренной задачи многовариантный расчет оказался примерно в 90 раз эффективней серии независимых расчетов.

Результаты работы могут быть иллюстрацией того, как специалист-физик на персональном компьютере может исследовать физические процессы в реакторе без дорогостоящих и опасных экспериментов.

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

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Pavshook V., Vasilyev A., Kiryushin A. e.a. A concept of the multichannel pulse graphite reactor MIGR. — In: Intern. Embedded Topical Meeting «Physics, Safety and Applications of Pulse Reactors», Washington, 13—17 November, 1994, p. 274—280.
2. 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.
3. Agnaitova 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. 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 (М., ЦИИИАтоминформ).
5. Васильев А.П., Горин Н.В., Кандиев Я.З. и др. Верификация методик расчета характеристик импульсного графитового реактора. — Атомная энергия, 1996, т. 80, вып. 3, с. 150—153.
6. 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.
7. 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.

Поступила в Редакцию 22.09.99

УДК 621.039.58

РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ ПОЛЯ ЦИЛИНДРИЧЕСКОГО ПОГЛОЩАЮЩЕГО ИЗЛУЧАТЕЛЯ В НАПРАВЛЕНИИ ОБРАЗУЮЩЕЙ

Курдяев Ю.Б. (Филиал Северо-Западной академии государственной службы)

Потребность в определении параметров поля излучения (мощность дозы, плотность потока) при произвольном расположении точки детектирования относительно цилиндрического поглощающего излучателя возникает при прогнозе радиационной обстановки вблизи больших цилиндрических излучающих объемов на ядерных или других объектах. С аналогичной задачей приходится встречаться и при работе с радиометрической системой объемный источник — объемный детектор в условиях, когда высота источника меньше высоты детектора [1].

В литературе приводится решение этой задачи только для случая, когда точка детектирования располагается в пределах высоты излучателя (область C на рис. 1) [2, 3]. Решение задачи для более общего случая расположения точки детектирования относительно излучателя (область A и C) по методике, приведенной в этих работах, не представляется возможным. Поэтому перейдем от цилиндрической системы координат к сферической с началом в точке детектирования P . Полярную ось координат Z расположим параллельно оси излучателя. Нулевую меридиональную плоскость ориентируем так, чтобы она была перпендикулярна плоскости, проходящей через ось

излучателя и полярную ось (эта плоскость перпендикулярна плоскости рис. 2, a и проходит через ось PY). Сечение излучателя плоскостью PZf , проходящей под углом φ_f от нулевой меридиональной плоскости, показано на рис. 2, b .

Исходный вид общего выражения для расчета мощности дозы от цилиндрического поглощающего источника при произвольном положении точки детектирования для выбранной системы координат без учета рассеянного компонента будет иметь следующий вид:

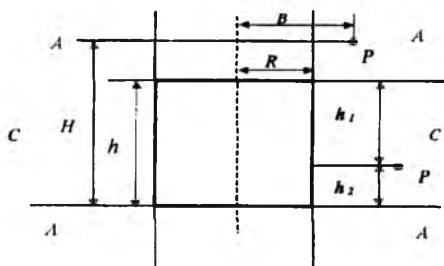


Рис. 1. Радиометрическая система цилиндрический излучатель—точечный детектор