

ПРИМЕНЕНИЕ НЕАНАЛОГОВЫХ МЕТОДОВ В КОДЕ MCNP ДЛЯ РАСЧЕТНОГО АНАЛИЗА ИЗМЕРЕНИЙ СКОРОСТЕЙ РЕАКЦИЙ НА КРИТИЧЕСКИХ СБОРКАХ БФС

О.Н. Андрианова, Г.Н. Мантуров, Е.В. Рожихин

АО «ГНЦ РФ-ФЭИ», 249033, г. Обнинск, Калужской обл., пл. Бондаренко, 1



Расчетный анализ измерений распределения скоростей реакций и возмущений реактивности, проводимых на критических сборках БФС, важен как для получения информации для уточнения нейтронных данных, так и оценки точности реакторных характеристик. В условиях сильной гетерогенности активных зон критическихборок возникает необходимость применения кодов, позволяющих воспроизводить точное описание геометрии и детальное представление энергетической зависимости характеристик нейтронных взаимодействий. В то же время при проведении серийных верификационных тестов библиотек нейтронных данных и программных кодов требуются существенные затраты машинного времени. В таких случаях для достижения требуемой точности расчета реакторных функционалов необходимо применение неаналоговых методов расчета (методов понижения дисперсии). В работе рассмотрены алгоритмы повышения эффективности расчетов на основе неаналоговых методов, реализованных в коде MCNP, на примере анализа экспериментов по измерению скоростей реакций в критических размножающихся системах со сложной гетерогенной структурой. Результаты выполненного анализа показали, что комбинация пространственного и энергетического расщеплений в методе весовых окон приводит к существенному повышению эффективности расчета и сокращению машинного времени от нескольких дней до нескольких часов при статистических ошибках в спектральных индексах ниже 2%.

Ключевые слова: интегральные критические эксперименты, критический стенд БФС, скорости реакций, методы понижения дисперсии, MCNP.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время большое внимание уделяется направлению работ по уточнению реакторных констант из измерений распределений скоростей реакций и возмущений реактивности на критических сборках. Данные эксперименты важны как для получения информации для уточнения нейтронных данных, так и оценки точности некоторых важных реакторных характеристик (например, измерение отношений скоростей захватов ^{238}U и делений ^{235}U позволяют оценить точность предсказания коэффициента воспроизводства) [1]. В условиях сильной гетерогенности активных зон критическихборок возникает необходимость применения кодов, позволяющих воспроизводить точное описание геометрии и детальное представление энергетиче-

© О.Н. Андрианова, Г.Н. Мантуров, Е.В. Рожихин, 2016

ческой зависимости характеристик нейтронных взаимодействий. Это позволяют делать коды, основанные на методе Монте-Карло (например, MCNP [2]). В то же время для ряда задач даже при современном высоком уровне развития вычислительной техники достижение статистически надежных результатов сопряжено со значительными затратами вычислительного времени. Данное обстоятельство становится критичным для решения тех задач, которые требуют проведения серийных многовариантных расчетов [3]: сравнение групповых библиотек и файлов библиотек оцененных ядерных данных (ОЯД) на основе расчетов локальных функционалов, оценка погрешностей нейтронно-физических характеристик и пр.

В последние годы исследовательские группы из национальных лабораторий Окриджа и Лос-Аламоса (США) активно работали над развитием неаналоговых методов (методов понижения дисперсии (МПД), впоследствии реализованных в MCNP, MVC и др.). Однако большинство из этих методов ориентированы на повышение точности решения задач с постоянным внешним источником (задачи радиационной защиты) и не адаптированы под задачи оценки локальных билинейных функционалов в гетерогенных критических системах. В связи с этим возникла задача по поиску и обоснованию метода повышения эффективности неаналогового расчета локальных функционалов в критических средах с сильной гетерогенностью, который не приводил к смещенной оценке функционала.

ОСОБЕННОСТИ РАСЧЕТА РЕАКТОРНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК СБОРК БФС С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПРЕЦИЗИОННЫХ КОДОВ

В настоящее время большое внимание уделяется экспериментам по измерению отношения скоростей реакций. Анализ подобных измерений очень важен для проведения верификационных расчетов по уточнению реакторных констант и включает в себя создание приемлемой расчетной модели для выполнения серии расчетов с целью сравнения групповых библиотек и файлов ОЯД [4].

В работе приводится анализ серии экспериментов по измерению отношений скоростей делений на наборах критических конфигураций БФС. Ячейки активных зон критических сборок собраны из стандартных для БФС таблеток плутония, обедненного урана и материалов, имитирующих разные типы жидкометаллических теплоносителей и конструкционных материалов. Торцевые и боковые экраны были составлены из двуокиси обедненного урана. Активные зоны рассматриваемых сборок состояли из алюминиевых труб диаметром 5.1 см, содержащих ячейки, представляющие собой набор различных компоновок таблеток из делящихся материалов, материалов теплоносителя и конструкционных материалов.

Существует несколько методик измерений спектральных индексов (отношений скоростей деления различных изотопов) на сборках БФС [5], одна из которых основана на использовании малогабаритных камер деления, помещаемых при помощи манипулятора в межтрубные зазоры активной зоны (рис. 1 а). Малогабаритная камера деления представляет собой цилиндрическую трубку из нержавеющей стали диаметром 0.6 см, длиной 12 см и толщиной стенки 0.05 см. Регистрационный объем камеры деления представляет собой небольшой объем, образованный цилиндрической областью диаметром 0.6 см (диаметр камеры) и высотой 3 см (высота делящегося слоя камеры). Для корректного описания данных экспериментов требуется составление детальных расчетных моделей по прецизионным кодам; наиболее широкие возможности в описании геометрии таких систем предоставляет MCNP.

Для расчета спектральных индексов необходимо вычислить произведение усредненного по регистрационному объему потока $\langle \phi \rangle_V$ в области размещения камеры в активной зоне (R – положение в межтрубном зазоре относительно центрального канала ак-

тивной зоны; H – положение по высоте относительно центральной плоскости активной зоны) на сечение s_K соответствующей реакции K . Интеграл такого произведения по энергии равен скорости реакции, и может быть записан следующим образом:

$$K_i(R, H, E) = \int_E \langle \varphi(R, H, E) \rangle_v \sigma_K^i(E) dE.$$

С помощью малогабаритных камер деления в экспериментах измерялись отношения скоростей деления ^{239}Pu , ^{238}U к скорости деления ^{235}U ($F49/F25$ и $F28/F25$). Также рассмотрены эксперименты по измерению отношений скорости захвата ^{238}U к скорости деления ^{235}U ($C28/F25$), выполненные методом активации с помощью фольг естественного и обогащенного урана, расположенных в разрезной таблетке или между двумя таблетками в центральной ячейке. Схема расположения фольг между двумя таблетками приведена на рис.1 б).

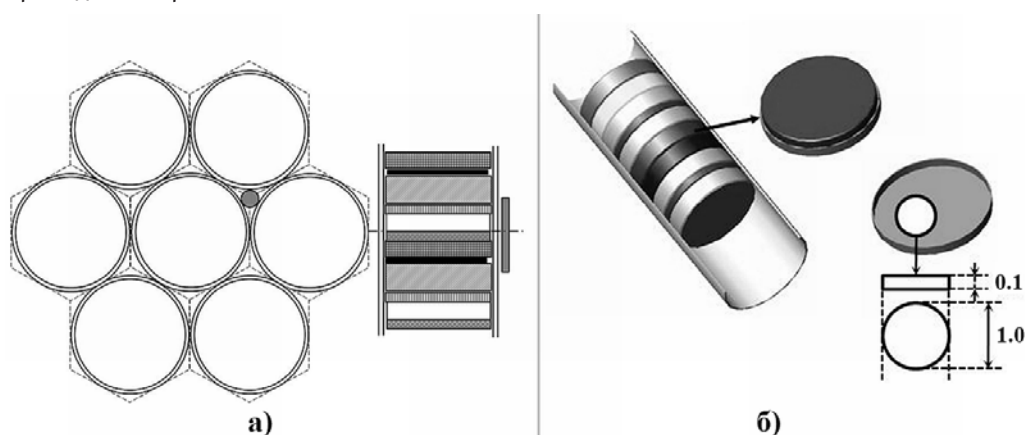


Рис.1. Расположение малогабаритных камер деления в межтрубном зазоре активной зоны БФС (а) и активационных фольг при измерении скоростей реакций (б)

Данные интегральные эксперименты, важные для определения точности предсказания нейтронно-физических характеристик проектируемых быстрых реакторов, выполнялись в разные годы на БФС и моделировали различные по составам и конфигурациям активные зоны жидкометаллических реакторов на быстрых нейтронах. Для проведения расчетов были составлены детальные расчетные модели для MCNP и выполнены оценки данных экспериментов, вошедшие в базу реакторных экспериментов справочника IRRPhEP [6 – 9]:

- БФС-31,-33,-35,-38,-42 – модели активных зон реакторов для изучения свойств топливных материалов в быстром спектре;
- БФС-57,59 – сборки по изучению свойств уран-плутониевого топлива;
- БФС-61 – модель реактора со свинцовым теплоносителем;
- БФС-62 – модель гибридной зоны реактора БН;
- БФС-97,-99,-101 – модели по изучению критических масс при производстве уран-плутониевого топлива;
- БФС-73 – модель реактора типа БН с урановым топливом.

В MCNP реализован широкий спектр МПД, которые упрощены и автоматизированы, что существенно повышает эффективность их использования [10, 11]. Для характеристики эффективности МПД в MCNP введено понятие «эффективность расчета» – FOM (от англ. *figure of merit*), связывающее между собой два конфликтующих показателя: время счета T и квадрат относительной ошибки оценки R^2 рассчитываемого функционала ($FOM=1/(R^2 \cdot T)$). Поскольку R^2 обратно пропорционально времени счета T , то эффектив-

ность метода *FOM* является постоянной величиной при одних и тех же параметрах задачи. В коде MCNP величина *FOM* является одним из важнейших показателей надежности и эффективности оценки расчетных функционалов (скорость реакции, средний поток по ячейке, поток в точке и т.д.). Типичный для прямого расчета показатель эффективности равен единице; это означает, что для достижения относительной ошибки, равной 1%, потребуется семь дней, а равной 2% – два дня. Если каким-то образом удастся увеличить эффективность в 10 раз, то даже 1% будет достигнут меньше чем за одни сутки.

Характерная черта рассматриваемой задачи – симметрия. С учетом симметрии для улучшения статистики в каждом конкретном случае выбирались максимально возможные расчетные объемы так, чтобы смещения в расчетных значениях от такого изменения реальной геометрии были минимальными. Важно, что измерения активационной методикой и малогабаритными камерами (как центральных индексов, так и распределений по высоте) необходимо оценивать в одном расчетном задании. Для измерений в пустом канале и распределений по радиусу строились отдельные расчетные модели.

Прямой расчет скоростей реакций, измеренных на сборке БФС-97-1 без водородсодержащего замедлителя, дал удовлетворительные результаты. При переходе к сборке БФС-97-3 оказалось, что точность рассчитываемых функционалов на порядки превышает точность, требуемую для такого вида оценок (1–2%). Это означает, что чтобы погрешность оценки лежала в необходимых пределах, нужно увеличить время счета на два порядка. Если типичное время счета для этихборок составляет примерно пять часов, то для достижения статистически надежных результатов (без использования МПД) потребуется около 20-ти дней.

В таблице 1 приведены эффективности прямого расчета функционалов во второй и пятой колонках (величина $V_{\text{рас}}/V$ – отношение расчетных объемов к общему объему активной зоны). Очевидно, что уменьшение расчетного объема приводит к падению эффективности расчета вследствие снижения вероятности нейтрону пересечь малую область.

Таблица 1

Показатели эффективности прямого расчета

Тип конфигурации	Активационный метод			Малогабаритные камеры деления				
	$V_{\text{рас}}/V \times 10^{-8}$	FOM C28	FOM F25	$V_{\text{рас}}/V \times 10^{-4}$	FOM C28	FOM F28	FOM F25	FOM F49
БФС-97-1	10	25	47	7	80	35	183	195
БФС-97-3	16	1	5	15	0.3	90	25	7
БФС-99-1	13	0.5	4	12	0.4	75	22	6
БФС-101-2	2	0.6	2	2	0.2	20	7	3
БФС-42	3	0.8	8	4	1.2	10	25	7
БФС-59	2	0.3	4	4	0.7	78	44	37
БФС-34-1	0.6	0.1	0.6	0.7	0.5	1	3	3

Поскольку целесообразно оценивать все функционалы в одном расчетном задании, то необходимо ориентироваться по функционалу с минимальной эффективностью. Если для гомогенной сборки БФС-97-1 такая эффективность расчета высока (~25), то для остальныхборок она меньше единицы.

МЕТОДЫ ПОНИЖЕНИЯ ДИСПЕРСИИ

МПД помогают существенно сокращать время счета, однако некорректное их применение сопряжено с большим риском получения трудновывяемой смещенной оценки. Использование МПД в большей степени оправданно при моделировании событий, которые в реальной системе происходят крайне редко – когда для извлечения ценной

информации аналоговым методом требуется большой объем вычислений.

Первая сложность применения МПД – это выбор приемлемого метода. Выделяют четыре класса МПД: методы усечения, методы регулирования числа частиц, методы искажения выборки, частично-детерминистические методы. Все эти методы основаны на искажении аналоговых процессов с целью более частого появления интересующего события.

Каждый из этих методов рассчитан на определенный круг задач. Методы искажения выборки, такие как методы смещения источника, экспоненциального преобразования и искусственного поглощения, используются для задач радиационной защиты. Метод коррелированной выборки применим при расчете возмущений. Методы принудительных столкновений и точечного детектора используются для определения вклада в точечный детектор. Из всех перечисленных методов к рассматриваемому типу задач подходят следующие методы: расщепление-рулетка по ячейкам, расщепление-рулетка по энергии, весовые окна, искусственное поглощение, усечение по геометрии и (или) комбинации этих методов.

Для задач с внешним источником существуют рекомендации по выбору как самих МПД, так и их параметров [10]. Для задач оценки локальных билинейных функционалов в гетерогенных критических системах эти методы не адаптированы, так, например, для автоматического подбора параметров для метода весовых окон в программу встроен пакет модулей, осуществляющих с помощью детерминистической модели вычисление функции ценности по отношению к детектору. Вычисление функции ценности для критической задачи не предусмотрено [2].

Основной задачей является подбор оптимальных МПД (либо их комбинации) без проведения дополнительных расчетов с привлечением детерминистических программ. Специфика задачи (сильногетерогенная среда, необходимость проведения серии вариантов расчетов) налагает дополнительные ограничения: во-первых, относительная ошибка расчета функционала не должна превышать 2%, во-вторых, время счета не должно превышать, по крайней мере, двух суток.

Таблица 2

Сравнение отношения показателей эффективности прямого расчета и расчетов с использованием различных МПД

Вариант	Эффективность (FOM)					
	Метод активации		Малогобаритные камеры деления			
	C28	F25	C28	F28	F25	F49
0 без МПД	1	5	0.3	90	25	7
МПД	T_0/T_i					
1	3	4	5	1.6	1.5	2
2	4	4	7	7	6	6
3	5	6	21	8	17	15
4	10	7	14	6	6	5
5	15	20	20	5	20	30

С целью выбора наиболее приемлемого МПД были выполнены расчеты для сборки БФС-97-3. В таблице 2 приведены результаты по ускорению времени счета с применением различных вариантов МПД. В первой колонке указан номер рассмотренного варианта расчета (0 – вариант расчета без привлечения МПД, 1 – расщепление рулетка (2×4×8×16×32), 2 – весовые окна (ВО) по ячейкам реальной геометрии, 3 – ВО по ячей-

кам и энергии, 4 – В0 – независимая сетка по геометрии, 5 – В0 – независимая сетка по геометрии и энергии). Все результаты расчетов, полученных с использованием МПД, сравнивались с результатами прямого расчета с расчетной точностью ниже 1.5%, расхождения в результатах прямого и непрямого расчетов не превышали 1%. Было выявлено, что комбинация пространственного и энергетического расщепления в методе весовых окон приводит к существенному повышению эффективности расчета: к сокращению времени от семи дней до 10-ти часов при относительной ошибке ниже 2% (табл. 2).

Та же схема расщепления по энергии и пространству была применена для остальных сборок этого типа. В таблице 3 приводятся данные о сокращении времени счета. Видно, что даже для случая, когда для достижения точности 2% требовалось более 20-ти дней, полученное увеличение эффективности приводит к сокращению времени расчета до двух дней.

Таблица 3

Сравнение отношений показателя эффективности прямого расчета и расчета с использованием пятого варианта МПД

Тип конфигурации	Метод активации		Малогобаритные камеры деления			
	C28	F25	C28	F28	F25	F49
БФС-97-3	15	20	20	15	20	30
БФС-99-1	13	17	12	7	18	25
БФС-101-2	12	10	25	7	17	15
БФС-42	20	10	20	15	20	30
БФС-44	25	16	15	12	15	15
БФС-59	25	19	23	8	17	15
БФС-61	25	24	15	10	20	25
БФС-34-1	28	25	13	9	14	19

РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ

Для построения модели одновременного (в одном расчетном задании) расчета экспериментов по измерению отношений скоростей реакций, проведенных двумя различными методиками (активационной и малогабаритными камерами), необходимо было применить МПД так, чтобы точность всех оцениваемых расчетных характеристик была примерно одного порядка. При этом принимались дополнительные условия на время счета и точность, достигаемую за этот промежуток времени.

В таблице 4 приведено сравнение результатов расчета и эксперимента отношений скоростей реакций, полученных в ходе выполнения одного расчетного задания. В четвертом столбце приведена экспериментальная относительная погрешность результатов в процентах, в пятом – выдаваемая программой расчетная погрешность. Как видно, для всех типов отношений, независимо от методики измерения, расчетная погрешность не превышает экспериментальной погрешности. При этом отношение расчет-эксперимент (столбец 6) не выходит за пределы экспериментальной погрешности или, по крайней мере, лежит в пределах 3σ .

Выполненный расчетный анализ продемонстрировал, что разумное использование МПД, реализованных в MCNP, позволяет создавать надежные и эффективные расчетные модели интегральных экспериментов по определению локальных функционалов в сильно гетерогенных системах, важных с точки зрения верификации нейтронных данных [12 – 15] и оценки константной погрешности нейтронно-физичес-

ких функционалов. Это дает возможность представлять эксперименты в качестве бенчмарк-моделей [16].

Для всех рассмотренных критических конфигураций сборок были посчитаны k_{eff} по системам констант РОСФОНД2010 и БНАБ-РФ [17]. Различие результатов расчетов k_{eff} , выполненных на основе группового приближения (БНАБ-РФ), с результатами расчетов, проводимых по РОСФОНД2010, не превышает 0.2%; расхождение между расчетом и экспериментом не превышает 0.3% $\Delta k/k$.

Таблица 4

Результаты расчетов отношений скоростей реакций

1	2	3	4	5	6	7
Индекс	Тип сборки	Эксп.знач.	$R_0, \%$	$R_P, \%$	$P/\Sigma-1, \%$	$R, \%$
Малогобаритные камеры деления F49/F25	БФС-97/1	1.106	1.4	0.5	-0.5	1.5
	БФС-97/3	1.727	1.7	0.7	-2.1	1.8
	БФС-99/1	1.703	1.7	0.7	0.1	1.8
	БФС-101/2	1.822	1.4	0.6	-0.7	1.5
	БФС-42	0.898	1.9	0.6	3.6	2.3
	БФС-31-4	0.899	1.8	0.9	0.3	2.0
	БФС-59	2.090	1.0	1.5	-1.4	1.7
	БФС-61	1.057	1.0	1.0	-1.0	1.4
	БФС-62	0.965	1.0	1.0	-0.6	1.2
Малогобаритные камеры деления F28/F25	БФС-97/1	0.0553	2.5	0.7	0.5	2.6
	БФС-97/3	0.0168	2.9	0.6	-0.6	3.0
	БФС-99/1	0.0166	2.9	0.6	-2.4	3.1
	БФС-101/2	0.0109	2.8	0.9	1.8	2.9
	БФС-42	0.0189	2.1	0.6	-5.3	2.2
	БФС-31-4	0.0179	2.8	1.7	0.6	3.3
	БФС-59	0.00250	2.8	0.8	-4.4	2.9
	БФС-61	0.0320	2.5	1.9	-2.6	3.0
	БФС-62	0.0218	2.0	1.3	2.3	2.5
Метод активации C28/F25	БФС-97/1	0.1137	2.4	0.9	-0.5	2.5
	БФС-97/3	0.0657	2.5	1.0	0.5	2.7
	БФС-99/1	0.0662	3.0	1.3	2.0	4.1
	БФС-101/2	0.0548	2.2	1.4	1.5	2.6
	БФС-31-4	0.143*	2.8*	1.5*	0.8*	3.2*
		0.129	2.9	1.4	-1.6	3.4
	БФС-42	0.155	2.6	1.3	2.0	3.0
	БФС-61	0.126	2.2	0.8	2.3	2.8
	БФС-73	0.1114	2.3	0.9	0.5	3.2

*) Измерения фольгами в межтрубном зазоре

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящее время большое значение уделяется разработке, развитию и адаптации к новому кругу задач МПД. Выполненный в работе анализ возможных МПД и их комбинаций, реализованных в MCNP, показал, что для выполнения многовариантных расчетов за приемлемое время при условии достижения требуемой точности расчетных функционалов необходимо применение неаналоговых методов ускорения расчетов.

Результаты выполненного анализа показали, что комбинация пространственного и энергетического расщеплений в методе весовых окон приводит к существенному повышению эффективности расчета и сокращению машинного времени от нескольких дней до нескольких часов при статистических ошибках в спектральных индексах ниже 2%. МПД, реализованные в MCNP, позволяют создавать надежные расчетные модели интегральных экспериментов по определению локальных функционалов в сильно гетерогенных системах. Представляется целесообразным дальнейшая адаптация, обоснование и доработка заложенных МПД для расчета других важных локальных функционалов (например, возмущение реактивности образцами малых размеров).

Литература

1. Николаев М.Н. Константное обеспечение расчетов быстрых реакторов. Путь к современному состоянию и задачи дальнейшего развития // Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2013. – №4. – С. 5 – 16.
2. Briesmeiser J.F., Brown J.S. MCNP-A General Monte Carlo N-Particle Transport Code, Version 5, User's Guide, Volume II. LA-CP-03-0245, LANL, 484 P. (2003).
3. Андрианова О.Н., Мантуров Г.Н. и др. Использование метода GRS для оценки погрешности нейтронно-физических характеристик перспективного быстрого реактора // Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2014. – №2. – С. 90-98.
4. Кочетков А.Л., Матвеев И.П., Семенов М.Ю. и др. Критические эксперименты на стенде БФС-2 в поддержку размещения МОХ-топлива в реакторы БН // Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2007. – №2. – С. 16 – 27.
5. Дулин В.А., Казанский Ю.А. и др. Некоторые физические исследования на быстрых критических сборках БФС-1 // Атомная энергия. – 1976. – Т. 40, вып. 5. – С. 377 – 381.
6. V. Doulin, A. Kochetkov, O. Pavlova et al. "BFS1-FUND-EXP-003. Experimental Program Performed at the BFS-42 Assembly - K-Infinity Experiments for 238U in Fast Neutron Spectra: Measurements with Plutonium Mixed with Depleted Uranium Dioxide and Polyethylene", International Handbook of Evaluated Reactor Physics Benchmark Experiments, NEA/NSC/DOC(2007)1, March 2007
7. Doulin V., Kochetkov A., Pavlova O. et al. BFS2-FUND-EXP-001. Experimental Program Performed at the BFS-31 Assembly - K-Infinity Experiments for 238U in Fast Neutron Spectra: Measurements with Plutonium Mixed with Depleted Uranium Dioxide and Polyethylene. International Handbook of Evaluated Reactor Physics Benchmark Experiments, NEA/NSC/DOC(2007)1, March 2007.
8. Doulin V., Kochetkov A., Pavlova O. et al. BFS2-FUND-EXP-001. BFS-97, -99, -101 Assemblies: Experimental Program on Critical Assemblies with Heterogeneous Compositions of Plutonium, Depleted-Uranium Dioxide, and Polyethylene. International Handbook of Evaluated Reactor Physics Benchmark Experiments, NEA/NSC/DOC(2007)1, March 2007.
9. Doulin V., Kochetkov A., Pavlova O. et al. BFS-57 and BFS -59 Assemblies: Experimental Program on Critical Assemblies with Heterogeneous Compositions of Enriched-Uranium Dioxide or Plutonium, Depleted-Uranium Dioxide, and Polyethylene. International Handbook of Evaluated Reactor Physics Benchmark Experiments, NEA/NSC/DOC(2007)1, March 2007.
10. Hodgdon A.D. A Variance Reduction Management Algorithm for MCNP, Transactions of the ANS, New Orleans, November 16-20, 2003. – Vol 89. – PP. 373-374.
11. Smith H.P., Wagner J.C. A Case Study in Manual and Automated Monte Carlo Variance Reduction with a Deep Penetration Reactor Shielding Problem // Nuclear Science and Engineering. – 2005. – Vol. 149. – PP. 23–37, 2005.
12. Кощеев В.Н., Мантуров Г.Н. и др. Верификация нейтронных данных основных реакторных материалов из библиотеки РОСФОНД на интегральных экспериментах // Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2014. – №1. – С. 204 - 214.
13. Andrianov A.A., Korovin Yu.A., Kuptsov I.S., Stankovskiy A.Yu. Interactive Information System for Preparation and Verification of Nuclear Data in the High-Energy Range // Journal of the Korean Physical Society. – August 2011. – Vol. 59. – No. 23. – PP. 1096-1099.
14. Andrianova O., Peregudov A., Raskach K., Tsibulya A. Application of GRS Method to Evaluation of Uncertainties of Calculation Parameters of Perspective Sodium-Cooled Fast Reactor / Proc. Int.

Conf. on Reactor Physics PHYSOR 2012. Knoxville, TN, USA, April 15-20, 2012.

15. *Andrianova O., Koscheev V., Lomakov G., Manturov G.* Neutron data adjustment based on integral critical experiments on the BFS-facility with different neutron spectrum. PHYSOR 2016, Sun Valley, ID 16222. May 1–5, 2016. – PP. 2166-2175.

16. Evaluation of Proposed Integral Critical Experiments with Low-moderated MOX Fuel, Report NEA OECD №6047, ISBN 92–64–01049–1, 124 p., 2005.

17. *Забродская С.В., Игнатюк А.В., Кощеев В.Н. и др.* РОСФОНД – Российская национальная библиотека оцененных нейтронных данных // Вопросы атомной науки и техники. Сер.: Ядерные константы. – 2007. – Вып. 1-2. С. 3–21.

Поступила в редакцию 12.03.2016 г.

Авторы

Андрианова Ольга Николаевна, старший научный сотрудник, канд. техн. наук

E-mail: oandrianova@ippe.ru

Мантуров Геннадий Николаевич, начальник лаборатории, канд. техн. наук

E-mail: mant@ippe.ru

Рожихин Евгений Юрьевич, старший научный сотрудник

E-mail: bnab@ippe.ru

UDC 621.039.51.17

APPLICATION OF MCNP NONANALOG TECHNIQUES FOR CALCULATIONS OF REACTION RATE MEASUREMENTS AT THE BFS FACILITIES

Andrianova O.N., Manturov G.N., Rozhikhin Ye.V.

JSC «SSC RF-IPPE»

1, Bondarenko sq., Obninsk, Kaluga reg., 249033 Russia

ABSTRACT

The BFS fast critical assemblies of the JSC «SSC RF – Institute for Physics and Power Engineering» are a unique experimental base for measuring different reactor functionals required to clarify and justify expected evaluations of both reactor core and ex-core characteristics. For years the data obtained on BFS integral critical experiments have been widely used to test and improve neutron cross-sections libraries and transport codes used for applications on fast reactor core design studies. Critical experiments performed at the BFS facilities provide a way to carry out a large series of studies needed for refining neutron data, including, for instance, measurements of central reactivity coefficients (reactivity introduced by material samples of various sizes) which allows testing the resonance structure of neutron cross-sections, but these experiments have not often been used previously for neutron cross-section adjustments. Experiments carried out in different years on various BFS core configurations and compositions were used for testing of project values of fast reactor models, studying physical properties of fuel, structural, and other materials, that brought to light data on neutron cross-sections used for correcting and adjusting neutron data for the neutron data library and transport codes.

An extensive experimental program included criticality, measurements of central reaction rate ratios, and fission rate distributions. The results of these measurements were evaluated and accepted for use as criticality and reactor physics parameters benchmarks. Calculations of criticality, central reaction rate ratios, and fission rate distributions were performed using the MCNP Monte-Carlo code using different files of evaluated nuclear data. The calculations showed that it is necessary to use variance

reduction techniques to get the desired uncertainty of reaction rate calculations. Using of different variance reduction techniques implemented in MCNP for calculations of local functionals in critical multiplying systems with complex heterogeneous geometry is considered in the report. Computational analysis of effectiveness of variance reduction techniques was performed by the example of calculations of the central reaction rates. Results of criticality, central reaction rate ratios, and fission rate distributions calculations with different files of evaluated nuclear data are presented.

Key words: integral critical experiments, BFS critical assemblies, reaction rate ratios, variance reduction methods, MCNP.

REFERENCES

1. Nikolaev M.N. Konstantnoe obespechenie raschjotov bystrykh reaktorov. Put' k sovremennomu sostojaniju i zadachi dal'nejshego razvitija [Nuclear data for calculations of fast reactors. Way to recent state and tasks for future development]. *Izvestia Visshikh Uchebnikh Zavedeniy. Yadernaya Energetika*. 2013, no 4, pp. 5-16 (in Russian).
2. Briesmeister J.F., Brown J.S. MCNP-A General Monte Carlo N-Particle Transport Code, Version 5, User's Guide, Volume II. LA-CP-03-0245, LANL, 2003. 484 p.
3. Peregudov A.A., Andrianova O.N., Manturov G.N., Raskach K.F., Semenov M. Yu., Tsibulya A.M. Ispolzovanie metoda GRS dlya ocenki pogreshnosti neitronno-fizicheskikh harakteristik perspektivnogo bistrogo reaktora [GRS Method to Evaluate Uncertainties in Calculation Parameters of an Advanced Fast Reactor]. *Izvestia Visshikh Uchebnikh Zavedeniy. Yadernaya Energetika*. 2014, no 2, pp. 90-98 (in Russian).
4. Kochetkov A.L., Matveenko I.P., Semenov M. Yu., Khomiakov Yu.S., Tsiboulia A.M. Kriticheskie jeksperimenty na stende BFS-2 v podderzhku razmeshhenija MOX-topliva v reaktory BN [Critical experiments on BFS-2 facility within maintenance of placement MOX-fuel in reactors BN]. *Izvestia Visshikh Uchebnikh Zavedeniy. Yadernaya Energetika*. 2007, no 2, pp. 16-27 (in Russian).
5. Dulin V.A., Kazanskii Yu.A., Mamontov V.F., Sidorov G.I. Some Physical Investigations in BFS-1 Fast Critical Assemblies. *Atomic Energy*. 1976, v. 40, no 5, pp. 377-381 (in Russian).
6. Doulin V., Kochetkov A., Pavlova O., Semenov M., Rozhikhin Ye. BFS1-FUND-EXP-003. Experimental Program Performed at the BFS-42 Assembly - K-Infinity Experiments for ^{238}U in Fast Neutron Spectra: Measurements with Plutonium Mixed with Depleted Uranium Dioxide and Polyethylene. International Handbook of Evaluated Reactor Physics Benchmark Experiments, NEA/NSC/DOC(2007)1, March 2007.
7. Doulin V., Kochetkov A., Pavlova O., Semenov M., Rozhikhin Ye. BFS2-FUND-EXP-001. Experimental Program Performed at the BFS-31 Assembly - K-Infinity Experiments for ^{238}U in Fast Neutron Spectra: Measurements with Plutonium Mixed with Depleted Uranium Dioxide and Polyethylene. International Handbook of Evaluated Reactor Physics Benchmark Experiments, NEA/NSC/DOC(2007)1, March 2007.
8. Doulin V., Kochetkov A., Pavlova O., Semenov M., Rozhikhin Ye. BFS2-FUND-EXP-001. BFS-97, -99, -101 Assemblies: Experimental Program on Critical Assemblies with Heterogeneous Compositions of Plutonium, Depleted-Uranium Dioxide, and Polyethylene. International Handbook of Evaluated Reactor Physics Benchmark Experiments, NEA/NSC/DOC(2007)1, March 2007.
9. Doulin V., Kochetkov A., Pavlova O., Semenov M., Rozhikhin Ye. BFS-57 and BFS -59 Assemblies: Experimental Program on Critical Assemblies with Heterogeneous Compositions of Enriched-Uranium Dioxide or Plutonium, Depleted-Uranium Dioxide, and Polyethylene. International Handbook of Evaluated Reactor Physics Benchmark Experiments, NEA/NSC/DOC(2007)1, March 2007.
10. Hodgdon A.D. A Variance Reduction Management Algorithm for MCNP. *Transactions of the ANS, New Orleans*. November 16-20, 2003, v. 89, pp. 373-374, 2003.
11. Smith H.P., Wagner J.C. A Case Study in Manual and Automated Monte Carlo Variance Reduction with a Deep Penetration Reactor Shielding Problem. *Nuclear Science and Engineering*. 2005, v. 149, pp. 23-37.
12. Koscheev V.N., Manturov G.N., Nikolaev M.N., Tsiboulia A.M. Verifikacija nejtronnykh dannyh osnovnykh reaktornykh materialov iz biblioteki rosfond na integral'nyh jeks-

perimentah [Verification of neutron data for main reactor materials from rosfond neutron data library on intergral experiments]. *Izvestia Vissikh Uchebnikh Zavedeniy. Yadernaya Energetika*. 2014, no 1, pp. 204 – 214 (in Russian).

13. Andrianov A.A., Korovin Yu.A., Kuptsov I.S., Stankovskiy A.Yu. Interactive Information System for Preparation and Verification of Nuclear Data in the High-Energy Range/ Journal of the Korean Physical Society. August 2011, v. 59, no. 23, pp. 1096-1099.

14. Andrianova O., Peregudov A., Raskach K., Tsibulya A. Application of GRS Method to Evaluation of Uncertainties of Calculation Parameters of Perspective Sodium-Cooled Fast Reactor // Proc. Int. Conf. on Reactor Physics PHYSOR 2012. Knoxville, TN, USA, April 15-20, 2012.

15. Andrianova O., Koscheev V., Lomakov G., Manturov G. Neutron data adjustment based on integral critical experiments on the BFS-facility with different neutron spectrum. PHYSOR 2016, Sun Valley, ID 16222 pp. 2166-2175, May 1–5, 2016.

16. Evaluation of Proposed Integral Critical Experiments with Low-moderated MOX Fuel, Report NEA OECD no 6047, ISBN 92–64–01049–1, 2005. 124 p.

17. Zabrodsкая S.V., Ignatyuk A.V., Koscheev V.N., Manohin V.N., Pronjaev V.G. ROSFOND – Rossijskaya nacional'naya biblioteka ocenennyh nejtronnyh dannyh [ROSFOND – The National Library of evaluated neutron data]. *Voprosy atomnoj nauki i tehniki. Ser.: Yadernye konstanty*. 2007, no 1-2, pp. 3-21 (in Russian).

Authors

Andrianova Olga Nikolaevna, Senior Researcher, Cand. Sci. (Engineering)

E-mail: oandrianova@ippe.ru

Manturov Gennady Nikolaevich, Head of Laboratory, Cand. Sci. (Engineering)

E-mail: mant@ippe.ru

Rozhikhin Yevgenij Valer'evich, Senior Researcher

E-mail: bnab@ippe.ru