

ГЕТЕРОГЕННЫЕ ЭФФЕКТЫ ПРИ МОДЕЛИРОВАНИИ БЫСТРОГО ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО РЕАКТОРА НА СТЕНДЕ БФС

Ю.А. Казанский, Г.В. Карпович

*Обнинский институт атомной энергетики НИЯУ МИФИ
249040, Россия, Калужская обл., г. Обнинск, Студгородок, 1*

Р

Моделирование реакторов на быстрых нейтронах для сопоставления экспериментальных и расчетных данных по нейтронно-физическим характеристикам проводят на стендах нулевой мощности. Расположение материалов в реальной конструкции реакторов (тепловыделяющих элементов и сборок, геометрии теплоносителя) отличаются от моделируемой. Отличия нейтронно-физических параметров, обусловленные геометрией расположения материалов при одних и тех же гомогенных концентрациях, называют гетерогенным эффектом.

Оценки гетерогенных эффектов для ряда функционалов рассчитывались при различных пространственных композициях материалов реактора для а) гетерогенного размещения в соответствии с конструкцией реактора на быстрых нейтронах; б) гетерогенного расположения в соответствии с возможностями и конструктивными особенностями стенда БФС; в) гомогенного представления материалов активной зоны и зон воспроизводства.

Основным вариантом расчетов, относительно которого вычислялся эффект, названный гетерогенным смещением значения функционала (ГСФ), принята компоновка материалов в соответствии с проектными данными реактора типа БН-1200. Проведена оценка влияния на ГСФ утечки нейтронов в результате расчетов с различными граничными условиями, а также проведены расчеты при использовании на стенде металлического плутония.

При различных компоновках материалов рассчитаны значения эффективного коэффициента размножения (запаса реактивности), натриевого пустотного эффекта реактивности, средней энергии нейтронов, вызывающих деление ядер, и значений отношений сечения радиационного захвата к сечению деления для ^{239}Pu . Расчеты выполнены с использованием программного комплекса Serpent 2.1.30 (VTT, Финляндия) и библиотек оцененных ядерных данных ENDF/B-VII.0 и JEFF-3.1.1.

Влияние различных способов размещения материалов на значения $k_{\text{эфф}}$ оказалось наибольшим при замене двуокиси делящегося материала на металл тех же материалов (около 1,6%). Гомогенная композиция снижает значение $k_{\text{эфф}}$ примерно на 0,4%.

Средняя энергия делящих нейтронов заметно зависит от утечки нейтронов и наличия натрия. Замена на БФС делящихся металлических материалов на их двуокиси может снизить среднюю энергию делящих нейтронов примерно на 60 кэВ. Наибольшее значение ГСФ (до 65%) наблюдается при расчете НПЭР при гомогенном расположении материалов, но при расчете модели на БФС равняется 1,5%. При отсутствии утечки нейтронов (бесконечно-протяженная среда) НПЭР становится положительным и ГСФ составляет 4 – 7%.

Гетерогенный эффект значений α для ^{239}Pu заметно зависит только от замены металлического плутония его двуокисью (при сохранении однородных концентраций).

Ключевые слова: гетерогенность, моделирование ядерных реакторов, критические стенды, реактор на быстрых нейтронах, БН, натриевый пустотный эффект реактивности, нейтронно-физический расчет, Монте-Карло.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Во второй половине прошлого века во многих странах уделялось большое внимание экспериментальным исследованиям физики реакторов на быстрых нейтронах. Наряду с дифференциальными измерениями сечений и их отношений в функции энергии нейтронов появились интегральные исследования на критических сборках (стендах), где экспериментально изучали многие интегральные характеристики, такие как средние сечения и их отношения, критические параметры, эффективности стержней регулирования, пространственные распределения плотности потока нейтронов, спектральные распределения плотности потока и т.д. Критстенды имели разные названия, отличия в конструкциях, но их объединяла общая идея – построить универсальные устройства, позволяющие с минимальными финансированием и затратами времени обеспечить моделирование ядерных реакторов на быстрых нейтронах с разной геометрией, с различными составами топлива, составами и долями теплоносителя, с внутренней и внешней зонами воспроизводства топлива. Такие стенды были построены в США (ZPR, ZPPR) [1, 2], СССР (БФС, КОБРА) [3, 4], Франции (MAZURKA) [5], Германии (SNEAK) [6], Японии (FCA) [7], Великобритании (ZEBRA) [8]. Основное назначение стендов заключалось в создании модели проектируемого реактора и получении на модели экспериментальных значений, сопоставление которых с расчетными позволяли делать выводы о надежности и погрешностях проектных значений нейтронно-физических параметров проектируемого реактора и вносить своевременно при необходимости соответствующие коррективы.

В настоящее время продолжают активно работать критстенды БФС в России. На этих стендах моделировалась последовательная цепочка исследовательских и энергетических реакторов на быстрых нейтронах БР-5, БОР-60, БН-350, БН-600, БН-800 и проектируемый реактор БН-1200.

Модель реактора, собранная на критстенде, отличается от реальной конструкции. Одно из основных отличий – это геометрии расположения топлива, теплоносителя, конструкционных материалов. Желание сделать критстенды универсальными привело к конструкции, где активная зона моделируемого реактора и его зоны воспроизводства набираются небольшими блоками из разных материалов. Влияние отличий геометрий расположения материалов при одинаковых однородных концентрациях в данной работе называется гетерогенным эффектом. Значимость гетерогенных эффектов тем больше, чем «мягче» спектрально-энергетическое распределение плотности потока по энергии и чем больше размеры блоков материалов, используемых на критстендах. Гетерогенная структура расположения материалов в промышленном реакторе и его модели на стенде БФС заметно отличаются. Для топлива оценку гетерогенности можно связать со средним значением хорды топливного элемента в виде $4V/S$ (V – объем топливного элемента, S – его поверхность). Для топлива энергетического реактора с натриевым теплоносителем средняя хорда составляет около 0,7 см, у топлива БФС для делящихся ядер – 0,4 см, а для урана-238 – 1,67 см. В связи с этим значительные отличия могут быть в эффектах блокировки в области резонансного поглощения нейтронов.

Цель работы – расчетным путем найти гетерогенные эффекты при моделировании

большого реактора на быстрых нейтронах типа БН на стенде БФС-2 путем сопоставления рассчитанных значений функционалов при различных расположениях материалов. Кроме того, были выполнены расчеты для выяснения погрешностей при оценках функционалов в предположении гомогенного расположения всех материалов, влияния утечки нейтронов и разных представлений делящихся материалов (металл и двуокись). Данная работа является продолжением более ранних работ. Отличие данной работы – это главный акцент не на сопоставление гетерогенного и гомогенного вариантов, а на сопоставление двух гетерогенных вариантов – проектной конструкции реактора и его модели на критстенде и на получение значений ГСФ при моделировании реактора типа БН-1200 на БФС с использованием современных библиотек оцененных ядерных данных.

Гетерогенные эффекты для разных критическихборок рассчитывались, например, в [9 – 12], где наблюдались гетерогенные эффекты (сопоставление с гомогенной композицией), достигающие 3 – 4% для значений $k_{эфф}$.

Работа [9] представляет собой обзор экспериментальных реализаций активных зон проектируемых быстрых реакторов на стендах типа БФС и их расчетов. Отмечается, что использование металлического плутония на стендах создает 1,5%-ый гетерогенный эффект для $k_{эфф}$ при сравнении с гомогенным расчетом. Вместе с этим указывается на наличие гетерогенного эффекта при переходе от пластинчатой структуры активной зоны на критстендах к конструкции с использованием стержневых твэлов – для $k_{эфф}$ этот эффект составляет примерно 0,5%.

В работе [10] изучались коэффициенты реактивности для реакторов на быстрых нейтронах с натриевым теплоносителем. При сравнении гомогенного и гетерогенного расчетов был отмечен заметный гетерогенный эффект для разных компонентов НПЭР. Для спектрального компонента он составил почти 110%, а для суммарного НПЭР гомогенный расчет дал превышение на 138%. Указывается на зависимость спектральной составляющей НПЭР от состава топлива – наличие ^{239}Pu и ^{240}Pu дает больший НПЭР по сравнению с урановой загрузкой активной зоны.

В работе [11] изучались малые возмущения, вносимые образцами материалов при помещении их в критическую сборку с быстрым спектром нейтронов. Для оценки данных возмущений использовались центральные коэффициенты реактивности. Гетерогенный эффект между гомогенным и гетерогенным представлением составляет 5 – 7%.

В работе [12] сравнивались расчетыборок БФС с данными экспериментов для проверки точности моделирования активных зон быстрых реакторов. Гетерогенный эффект для отношений сечений тяжелых ядер составил 0,2 – 1,5%.

Важной особенностью работ [11, 12] является исследование гетерогенных эффектов для сравнительно малых размеров активной зоны (примерно 50×70 см), причем в исследованиях сравнивались результаты эксперимента с гомогенным и гетерогенным расчетами. Гетерогенные эффекты между двумя представлениями активной зоны (проектной и на БФС) в них не изучались.

Расчеты в данной работе проводились при температуре 300 К и выполнены с использованием программного комплекса Serpent 2.1.30 (VTT, Финляндия) [13] и библиотек оцененных ядерных данных ENDF/B-VII.0 и JEFF-3.1.1. [14], поставляемых с комплексом.

ВЫБРАННЫЕ ФУНКЦИОНАЛЫ И РАСЧЕТНЫЕ МОДЕЛИ

Один из важнейших функционалов – эффективный коэффициент размножения, определяющий запас реактивности, который стремятся сделать по возможности меньше. С точки зрения ядерной безопасности хорошо было бы иметь запас реактивности менее эффективной доли запаздывающих нейтронов. Такая задача рассматривается в проекте реактора БРЕСТ-300 [15].

Для реакторов на быстрых нейтронах существенным интегральным показателем явля-

ется средняя энергия делящего нейтрона. В Serpent она определяется как среднее арифметическое энергий нейтронов, вызвавших деление любого нуклида.

Натриевый пустотный эффект реактивности (НПЭР) – важнейший функционал для оценки безопасности реактора. НПЭР весьма чувствителен к своим составляющим, поскольку он является алгебраической суммой компонентов с разными знаками – спектрального, захватного и утечки нейтронов. Значения этих компонентов изменяются непропорционально при удалении натрия из активной зоны реактора. Более того, знак НПЭР зависит от состава топлива и утечки нейтронов [16].

Воспроизводство делящихся материалов во многом зависит от отношения сечения радиационного захвата к сечению деления α , измерение которого оказывается достаточно сложной задачей. Целесообразно было изучить гетерогенный эффект и для этого функционала.

Для вычисления гетерогенного эффекта, обусловленного отличием размещения материалов в сравнении с аналогичным в проектной конфигурации, необходимо получить значения функционалов в следующих расчетных моделях.

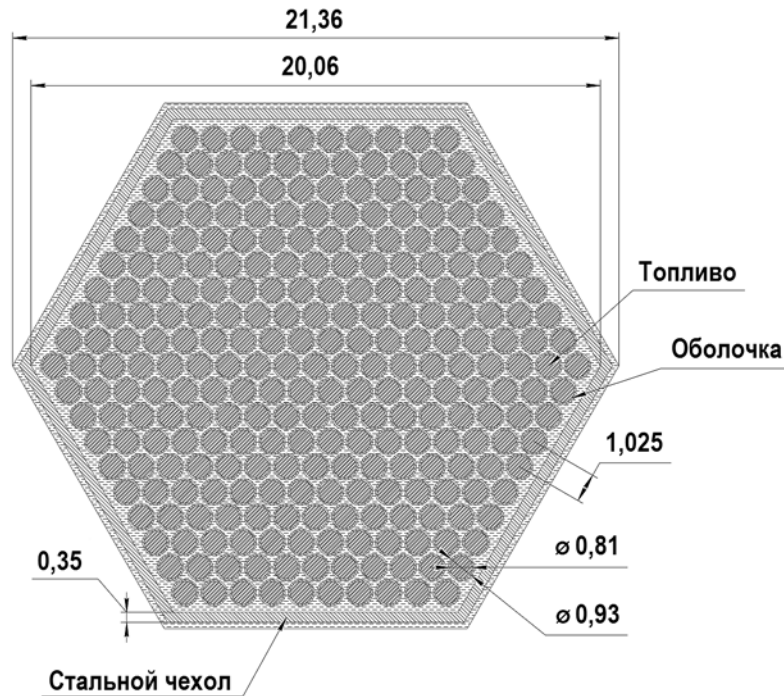


Рис. 1. Модель ТВС. Активная часть (размеры в см)

Таблица 1

Объемные доли материалов в различных частях ТВС

Часть ТВС	Na	Сталь	UO ₂ + PuO ₂
Нижняя газовая полость	0,298 (0,97)	0,231 (7,85)	–
Активная часть (АЧ), нижняя торцевая зона воспроизводства (НТЗВ)	0,298 (0,97)	0,231 (7,85)	0,471 (9,2 в АЧ) (9,5 в НТЗВ)
Натриевая полость	0,923 (0,97)	0,077 (7,85)	–

Примечание: объем, %; в круглых скобках – плотность, г/см³

М1. Ячейка модели ТВС с утечкой нейтронов. Моделируется полная активная зона реактора со всеми функциональными зонами, на внешних поверхностях которых установлена «черная граница», т.е. поглощение нейтрона, вышедшего за границы реактора. Расчетная ячейка этой модели и ее размеры показаны на рис. 1. Размеры ТВС и твэлов были сконструированы на основе данных о реакторе БН-1200 [17, 18], что позволило получить соотношение между объемными долями топлива, теплоносителя и конструкционных материалов (табл. 1). Поскольку целью работы является сопоставление гетерогенных эффектов реального расположения материалов в ТВС и модели реактора на критстенде БФС, более точного соблюдения параметров реактора БН-1200 не требуется.

М2. Гомогенизированная модель ячеек ТВС с утечкой нейтронов. Моделируется полная активная зона реактора со всеми функциональными зонами. От модели М1 (ТВС с утечкой нейтронов) отличается только гомогенным представлением расположения материалов.

М3. Модель ячеек БФС-металл с утечкой нейтронов. Моделируется полная активная зона реактора со всеми функциональными зонами. Модель набрана в представлении, которое можно реализовать на стенде БФС путем использования блочков с разными материалами, на внешних поверхностях моделируемой системы установлена «черная граница», как и в модели М1. Расчетная ячейка этой модели и ее размеры [3] показаны на рис. 2, часть вертикального разреза модели с геометрическими параметрами блочков [3] показана на рис. 3. В модели используется металлический плутоний в виде шайб массой около 125 г в стальной оболочке. Кислород размещен в межтрубном пространстве (оставшемся от помещения стальных стержней) и в свободном пространстве шайб с металлическим плутонием.

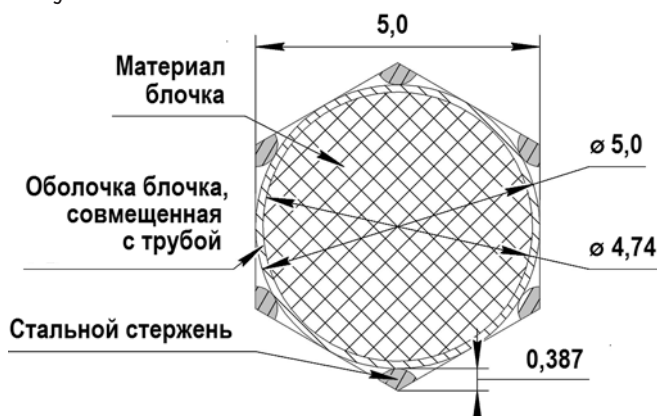


Рис. 2. Поперечный разрез ячейки БФС (размеры в см)

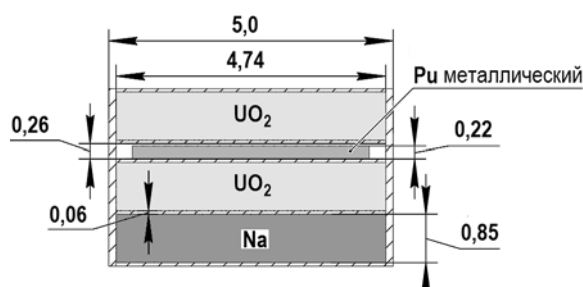


Рис. 3. Часть вертикального разреза ячейки БФС-металл (размеры в см)

М4. Модель ячеек БФС-двуокись с утечкой нейтронов. Соответствует модели БФС-металл, однако вместо металлического плутония используется смесь оксидов урана и плутония, загруженная в блочки из-под металлического плутония и из-под двуоксида урана. Различие между моделями М3 и М4 показано на рис. 4.

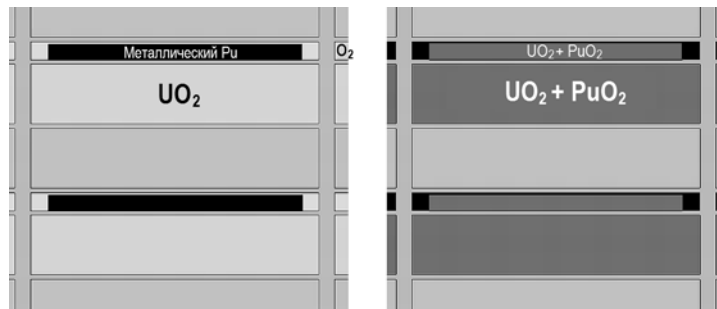


Рис.4. Расчетные модели БФС-металл (слева) и модели БФС-двуокись (справа)

Для выяснения влияния утечки нейтронов на значения ГСФ для каждой модели проведены расчеты в условиях бесконечно протяженной среды с составом, соответствующим составам активных зон вариантов М1 – М4. Расчетные модели активной зоны без утечки нейтронов обозначены М1[∞] – М4[∞].

При моделировании на стендах БФС реакторов на быстрых нейтронах используют так называемые «низкофононый» (95,17% ²³⁹Pu, 4,58% ²⁴⁰Pu, 0,25% ²⁴¹Pu) [3] и «высокофононый» (90% ²³⁹Pu, 9% ²⁴⁰Pu, 1% ²⁴¹Pu) плутоний. В качестве модели был выбран «высокофононый» с изотопным составом, в котором помимо ²³⁹Pu содержится 9% ²⁴⁰Pu и 1% ²⁴¹Pu. Для выяснения влияния на ГСФ изотопного состава плутония были проведены расчеты по моделям М1_{вф} – М4_{вф}, которые отличались от моделей М1 – М4 только тем, что вместо энергетического плутония (1% ²³⁸Pu, 66% ²³⁹Pu, 26% ²⁴⁰Pu, 3% ²⁴¹Pu, 2% ²⁴²Pu, 2% ²⁴¹Am) был использован «высокофононый».

На стендах БФС плутоний используется в виде металлических шайб. В то же время топливо в реакторах, в основном, используют в виде двуокиси. Поэтому значения ГСФ были вычислены и для случая использования топлива на моделях БФС в виде таблеток с металлическим плутонием. Проведены расчеты для выяснения влияния на значения ГСФ при замещении топливных таблеток с PuO₂ на металлические таблетки плутония и соответствующее количество кислорода.

Объемные доли различных материалов (топливо, теплоноситель, конструкционные материалы) для разных функциональных зон реактора представлены в табл. 1. По ним сначала рассчитывались изотопные составы функциональных зон реактора в гомогенизированном представлении. Затем полученные гомогенные составы использовались для создания гетерогенных моделей, соответствующих конструкции стенда БФС, поэтому пришлось изменять плотность материалов таким образом, чтобы в единице объема модели сохранялось количество ядер каждого нуклида, такое же, как и в гомогенном составе.

РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Гетерогенные смещения функционалов (ГСФ), приведенные в табл. 2 – 4 определялись в расчетах для каждого функционала следующим образом:

$$\text{ГСФ}(\Phi_i) = (\Phi_{i,\text{БФС}}/\Phi_{i,\text{ТВС}}) - 1,$$

где $\Phi_{i,\text{ТВС}}$ – расчетное значение функционала при расположении материалов в геометрии, соответствующей устройству реактора; $\Phi_{i,\text{БФС}}$ – расчетное значение функционала при расположении материалов в геометрии стенда БФС-2. Поскольку гомогенные концентрации материалов реактора и его модели на БФС были одинаковы, то различия в функционалах для реактора и его модели были обусловлены только различным гетерогенным расположением материалов.

В каждой таблице приведены также ГСФ функционалов для случая гомогенного расположения материалов, которые вычислялись по аналогичному алгоритму:

$$ГСФ(\Phi_i) = (\Phi_{i,ГОМ}/\Phi_{i,ТВС}) - 1,$$

$\Phi_{i,ГОМ}$ – значение функционала, рассчитанного при гомогенном расположении материалов.

ГСФ, связанные с гомогенным расположением материалов, дают представления о масштабах погрешностей при инженерных расчетах, не обремененных подробными деталями представления структуры твэлов и ТВС.

В таблице 2 показаны результаты расчетов ГСФ относительно результатов с расположением материалов в конструкции ТВС реактора для разных функционалов и трех вариантов представления условий расчета. Для всех результатов относительная погрешность расчетов с учетом погрешностей баз оцененных ядерных данных $\Delta k_{эфф} = 0,13\%$.

Таблица 2

ГСФ моделей реактора с учетом утечки нейтронов и энергетическим плутонием

Функционал	Модель М1	ГСФ моделей М1 и М2	ГСФ моделей М1 и М3	ГСФ моделей М1 и М4
$k_{эфф}$	1,1167	-0,39% (1.1123)	+1,45% (1.1329)	+0,45% (1,1217)
Средняя энергия «делящих» нейтронов, кэВ	807	-0,87% (800)	+7,93% (871)	+0,37% (810)
НПЭР	-0,00783	-65% (-0,00274)	+1,15% (-0,00792)	+1,53% (-0,00795)
α ^{239}Pu	0,295	0% (0,295)	-8,14% (0,271)	-0,34% (0,294)

Отметим следующие основные особенности полученных результатов.

ГСФ для НПЭР при гомогенном размещении материалов оказался очень большим (-65%), следовательно, рассчитывать НПЭР в гомогенном представлении бессмысленно. В то же время ГСФ для НПЭР в гетерогенных композициях БФС оказался в пределах 1,5%. Это означает, что гетерогенные композиции ТВС и ячейки БФС оказываются вполне взаимозаменяемы при расчете НПЭР. Смещение из-за гетерогенного эффекта в значении $k_{эфф}$ на 0,4% приводит к изменению запаса реактивности на 10% (если запас реактивности 4%).

ГСФ для всех функционалов, рассчитанных по моделям М1 и М4, только для значений НПЭР достигло 1,5%, а в остальных случаях значения ГСФ лежат в пределах $\pm 0.5\%$.

Значения ГСФ оказались чувствительными к изменению химической структуры плутония (замена двуокиси плутония на металл) и, как следствие, к заметным значениям ГСФ при проведении расчетов по моделям М1 и М3. При этом ГСФ для среднего значения делящих нейтронов оказался равным +8%, а для значения α -8%. Последний результат необходимо принимать во внимание, поскольку избыточный коэффициент воспроизводства весьма чувствителен к значениям α .

На значения ГСФ оказывает влияние утечка нейтронов. Сделана оценка этого влияния на основании сопоставления расчетов по моделям М1 $^\infty$ – М4 $^\infty$ (см. табл. 3).

В случае отсутствия утечки нейтронов (бесконечно протяженная активная зона) и гомогенной композиции материалов (модели М1 $^\infty$ и М2 $^\infty$) наибольшее значение ГСФ оказалось для НПЭР (около 7%). Наибольшие значения ГСФ отмечаются для всех функционалов, когда в расчетной модели БФС плутоний представляется металлически-

ми таблетками.

Результаты расчетов ГСФ с высокофоновым плутонием приведены в табл. 4.

Таблица 3

ГСФ моделей реактора без утечки нейтронов с энергетическим плутонием

Функционал	Модель M1 [∞]	ГСФ моделей M1 [∞] и M2 [∞]	ГСФ моделей M1 [∞] и M3 [∞]	ГСФ моделей M1 [∞] и M4 [∞]
$k_{эфф}$	1,2860	-0,58% (1,2785)	+1,94% (1,3109)	+0,12% (1,2875)
Средняя энергия «делящих» нейтронов, кэВ	744	-0,67% (739)	+6,72% (794)	-0,27% (742)
НПЭР	+0,02894	+7,74% (+0,03118)	-4,28% (+0,02770)	-7,50% (0,02677)
α ²³⁹ Pu	0,3023	-0,10% (0,3020)	-6,81% (0,2817)	+0,23% (0,3030)

Таблица 4

ГСФ моделей реактора с утечкой нейтронов и высокофоновым плутонием

Функционал	Модель M1 _{вф}	ГСФ моделей M1 _{вф} и M2 _{вф}	ГСФ моделей M1 _{вф} и M3 _{вф}	ГСФ моделей M1 _{вф} и M4 _{вф}
$k_{эфф}$	1,2493	-0,28% (1,2458)	+1,06% (1,2626)	+0,46% (1,2551)
Средняя энергия «делящих» нейтронов, кэВ	748	-0,67% (743)	+8,29% (810)	+0,53% (752)
НПЭР	-0,00844	-53,4% (-0,00393)	+8,18% (-0,00913)	+2,61% (-0,00866)
α ²³⁹ Pu	0,2787	+0,18% (0,2792)	-8,32% (0,2555)	-0,39% (0,2776)

Существенное изменение изотопного состава плутония очень слабо повлияло на значения ГСФ при аналогичных условиях проведения расчетов кроме ГСФ для НПЭР в модели БФС с металлическим плутонием. Это можно видеть из сопоставления результатов табл. 2 и 4. По-видимому, рост ГСФ при использовании металлического плутония связан с различными условиями блокировок сечений ²⁴⁰Pu.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Проведенные исследования позволяют сделать следующие выводы, подтвержденные количественными оценками. Моделирование ядерного реактора проводят на критстендах, имеющих гетерогенную структуру, отличающуюся от структуры проектируемого реактора. И это отличие (сформулированное как ГСФ), обусловленное разным расположением материалов, будет влиять на смещение значений рассчитываемых функционалов. Однако, как показали расчеты, если использовать одинаковую структуру материалов (в данном случае двуокись, а не отдельно металлический плутоний и «размазанный» по расчетной ячейке кислород), то ГСФ для всех выбранных функционалов в случае энергетического плутония лежит в пределах от -3 до +1,5%, тогда как реальная погрешность для $k_{эфф}$, обусловленная погрешностями в массах, обогащениях и плотностях топлива, в размерах твэлов и отношений

объемов топлива, теплоносителя и конструкционных материалов и т.д., составляет примерно 0,5% [3]. Основной вывод – различные размещения материалов в ТВС реактора и его модели при использовании материалов одинаковой молекулярной структуры слабо влияют на значения ГСФ.

2. Несколько большие значения ГСФ ($\pm 8\%$) получены для ситуации, когда на стенде БФС используют металлический плутоний, что влияет на значения ГСФ для функционалов, значения которых заметно зависят от спектрального распределения нейтронов (отношение сечений и среднее значение энергии нейтронов, вызывающих деление ядер). Значения ГСФ для НПЭР и $k_{эф}$ остались на том же уровне 1,5%.

3. Для простейших (инженерных) расчетов, когда используют однородное распределение материалов, выявлены оценки влияния на значения ГСФ детального описания ТВС и твэлов. Оказалось (сравните результаты расчетов для моделей М1 и М2 с различными граничными условиями и разным изотопным составом плутония), что для всех функционалов кроме НПЭР значения ГСФ не превышают одного процента. Этот вывод имеет смысл подтвердить расширением набора функционалов и тем самым повысить рейтинг инженерных расчетов. Однако расчет НПЭР с утечкой нейтронов неприменим без учета гетерогенной структуры (без корректного учета утечки нейтронов).

Благодарности

Авторы выражают благодарность профессору В.А. Дулину и доценту Г.М. Пшакину за замечания и предложения касательно особенностей моделирования на стенде БФС.

Литература

1. *Lell R.M., Morman J.A., Schaefer R.W., McKnight R.D.* ZPR-6 assembly 7 experiments: a fast reactor core with mixed (Pu,U)-oxide fuel and sodium with a thick depleted uranium reflector. ZPR-LMFR-EXP-001. International Handbook of Evaluated Reactor Physics Benchmark Experiments, NEA OECD, 2013.
2. *Ishikawa M., McKnight R.D.* ZPPR-10A experiment: a 650 MWe-class sodium-cooled MOX-fueled FBR homogeneous core mock-up critical experiment with two enrichment zones and nineteen control rod positions. ZPPR-LMFR-EXP-001. International Handbook of Evaluated Reactor Physics Benchmark Experiments, NEA OECD, 2013.
3. *Rozhikhin Yu., Semenov M.* BFS-61 assemblies: critical experiments of mixed plutonium, depleted uranium, graphite and lead with different reflectors. BFS1-LMFR-EXP-002. International Handbook of Evaluated Reactor Physics Benchmark Experiments, NEA-OECD, 2013.
4. *Лейпунский А.И., Орлов В.В., Казанский Ю.А., Зиновьев В.П., Украинцев Ф.И., Шапарь А.В., Клинов Н.А.* Комплекс БФС-1 – микротрон для изучения спектров нейтронов быстрых реакторов. // Атомная энергия. – 1974. – Т. 36. – Вып. 1. – С. 3-5.
5. *Bouget Y., Hammer P., Periot R., Kazansky Yu.* Etude d'interaction de barre dans les assemblages critiques BFS-24-16 (Obninsk) et MASURKA (Kadarache). – Fast Reactor Physics, (IAEA), 1980. – PP. 21-38.
6. *Bickel W., Engelmann P., Wittek G.* Sicherheitsbericht für die schnelle null-energie-anordnung Karlsruhe SNEAK. – Kernforschungszentrum Karlsruhe, 1965. – 353 p.
7. *Hirota J., Nomoto S., Hirakawa N., Nakano M.* Studies of the criticality of 20% enriched uranium fast critical assemblies (FCA-1). // Nuclear Science and Technology. – 1969. – Vol. 6. – PP. 35-42.
8. *Rowlands J., Zukeran A.* The ZEBRA MOZART Programme. ZEBRA-LMFR-EXP-002. International Handbook of Evaluated Reactor Physics Benchmark Experiments, NEA OECD, 2013.
9. *Kusters H., Pilati S.* The present accuracy of physics characteristics of unirradiated fast reactor cores. // Progress in Nuclear Energy. – 1985. – Vol. 16. – No. 3. – PP. 201-229.
10. *Le Sage L.G., Lineberry M.J., McFarlane H.F.* Current status of fast reactor physics reactivity coefficients. // Progress in Nuclear Energy. – 1985. – Vol. 16. – No. 3. – PP. 231-250.
11. *Бедняков С.М., Голубев Б.Н., Дулин В.А., Козловцев В.Г., Мамонтов В.Ф.* Эксперимен-

тальное обоснование методов оценки возмущений критичности быстрых сборок малыми образцами. // Атомная энергия. – 1988. – Т. 65. – Вып. 6. – С. 426-430.

12. Белов С.П., Дулин В.А., Жуков А.В., Кузин Е.Н., Можаяев Е.К., Ситников Н.И., Цибуля А.М., Шапарь А.Н., Зайферт Э., Куницман Б., Хайнцельман Б. Эффекты малой гетерогенности быстрых критическихборок. // Атомная энергия. – 1989. – Т. 66. – Вып. 1. – С. 13-17.

13. *Leppaanen J.* Serpent – a Continuous-Energy Monte Carlo Reactor Physics Burnup Calculation Code. User’s Manual. – VTT Technical Research Centre of Finland, 2015.

14. *Leppaanen J., Viitanen T.*, Cross section libraries for Serpent 1.1.7., Espoo. – VTT Technical Research Centre of Finland, 2013. – 58 p.

15. Орлов В.В., Смирнов В.С., Филин А.И. Детерминистическая безопасность реакторов БРЕСТ. // Энергия, экономика, техника, экология. – 2003. – № 10. – С. 13-20.

16. Хаммел Г., Окренг Д. Коэффициенты реактивности в больших энергетических реакторах на быстрых нейтронах. – М.: Атомиздат, 1975. – С. 69-106.

17. Электронный ресурс: <https://www.ippe.ru/nuclear-power/fast-neutron-reactors/122-bn1200-reactor> (дата доступа 21.05.2019).

18. Электронный ресурс: <http://www.innov-rosatom.ru/files/articles/b4589ee208b5b20af9c07c28921d4891.pdf> (дата доступа 21.05.2019).

Поступила в редакцию 30.04.2019 г.

Авторы

Казанский Юрий Алексеевич, профессор, д-р физ.-мат. наук
E-mail: kazansky@iate.obninsk.ru

Карпович Глеб Владиславович, ассистент
E-mail: gleb.karpovich@yandex.ru

UDC 53.088.4:621.039.7

HETEROGENEOUS EFFECTS IN SIMULATING A FAST NUCLEAR REACTOR ON THE BFS FACILITY

Kazansky Yu.A., Karpovich G.W.

Obninsk Institute for Nuclear Power Engineering, NRNU MEPhI
1 Stugorodok, Obninsk, Kaluga reg., 249040 Russia

ABSTRACT

The simulation of fast neutron reactors are modeled to compare experimental and calculated data on the neutron-physical characteristics on the zero power stands. This article discusses the BFS facility, which is in operation in Russia (Obninsk). The geometrical arrangement of materials in the actual design of reactors (fuel elements, fuel assemblies, coolant geometry) differs from the design on the BFS. This can cause differences in the experimental results at the BFS from theoretical calculations even in the case of careful observance of homogeneous concentrations of all materials of the reactor. Differences of neutron-physical parameters due to the geometry of the location of materials with the same homogeneous concentrations are called heterogeneous effect. Heterogeneous effects tend to increase with increasing reactor power and its size which is mainly due to changes in the neutron spectra.

The calculations of a number of functional values are carried out to assess the heterogeneous effects for different spatial arrangements of the reactor’ materials. The calculations were carried out for: a) heterogeneous distribution of materials in accordance with the design of a fast neutron reactor; b) heterogeneous arrangement

of materials in accordance with the capabilities and design features of the BFS facility; c) a homogeneous presentation of core materials and reproduction zones.

The basic version of the calculations, in relation to which the effect called the heterogeneous shift of the functional value (HSF), was calculated and adopted by the layout of materials in accordance with the design data of the BN-1200 reactors type.

The effect of neutron leakage on the HSF as a result of calculations with different boundary conditions was estimated. All calculations were carried out at the same homogeneous concentrations of all materials for all three compositions. Calculations were also carried out when using metallic plutonium on the BFS.

The values of the following functionals were calculated for different arrangements of materials: the effective multiplication factor (reactivity), the sodium void reactivity effect, the average neutron energy causing fission, and the ratios of the radioactive capture to the fission cross sections for ^{239}Pu .

The calculations were performed using the Monte Carlo software package for neutron physics modeling Serpent 2.1.30 (VTT, Finland) and the libraries of the evaluated nuclear data ENDF/B-VII.0 and JEFF-3.1.1.

The effect of various methods of materials replacing on the values of k_{eff} was greatest when replacing the dioxide of fissile material with metal of the same materials (about 1.6%). The homogeneous composition reduces the k_{eff} by about 0.4%.

The average neutron energy causing fission significantly depends on the leakage of neutrons and the presence of sodium (the average energy of the neutrons increases when sodium reaches about 100 keV, that is, by about 11 – 13%). Replacing fissile metallic materials with their dioxide on the BFS facility (while maintaining homogeneous concentrations, including oxygen) reduces the average energy of the neutrons causing fission by about 60 keV.

The highest values of HSF, reaching 65%, are observed when calculating the sodium void reactivity effect with a homogeneous arrangement of materials, but when calculating the model of the reactor at BFS it is 1.5%. In the absence of neutron leakage (infinitely extended medium), the sodium void reactivity effect becomes positive and the HSF is 4 – 7%.

The heterogeneous effect of α for ^{239}Pu significantly depends (6 – 8%) only on the replacement of metallic plutonium with its dioxide (naturally, while maintaining homogeneous concentrations).

Key words: heterogeneous effect, simulation of nuclear reactors, critical test benches, fast neutron reactor, BN, sodium void reactivity effect, neutron physical calculation, Monte Carlo.

REFERENCES

1. Lell R.M., Morman J.A., Schaefer R.W., McKnight R.D. *ZPR-6 assembly 7 experiments: a fast reactor core with mixed (Pu,U)-oxide fuel and sodium with a thick depleted uranium reflector*. ZPR-LMFR-EXP-001. International Handbook of Evaluated Reactor Physics Benchmark Experiments, NEA OECD, 2013.
2. Ishikawa M., McKnight R.D. *ZPPR-10A experiment: a 650 MWe-class sodium-cooled MOX-fueled FBR homogeneous core mock-up critical experiment with two enrichment zones and nineteen control rod positions*. ZPPR-LMFR-EXP-001. International Handbook of Evaluated Reactor Physics Benchmark Experiments, NEA OECD, 2013
3. Rozhikhin Y., Semenov M. *BFS-61 assemblies: critical experiments of mixed plutonium, depleted uranium, graphite and lead with different reflectors*. BFS1-LMFR-EXP-002. International Handbook of Evaluated Reactor Physics Benchmark Experiments, NEA-OECD, 2013.
4. Leipunsky A.I., Orlov V.V., Kazansky Yu.A., Zinoviev V.P., Ukraintsev F.I., Shapar A.V., Klintsov N.A. Complex BFS-1 – microtron for studying the neutron spectra of fast

- reactors. *Atomnaya Energiya*. 1974, v. 36, no. 1, pp. 3-5 (in Russian).
5. Bouget Y., Hammer P., Periot R., Kazansky Yu. *Etude d'interaction de barre dans les assemblages critiques BFS-24-16 (Obninsk) et MASURKA (Kadarache)*. Fast Reactor Physics, (IAEA), 1980, pp. 21-38.
 6. Bickel W., Engelmann P., Wittek G. *Safety report for the fast zero-power arrangement Karlsruhe SNEAK*. Nuclear Research Center Karlsruhe, 1965, 353 p.
 7. Hirota J, Nomoto S, Hirakawa N, Nakano M. Studies of the criticality of 20% enriched uranium fast critical assemblies (FCA-I). *Nuclear Science and Technology*. 1969, v. 6, pp. 35-42.
 8. Rowlands J., Zukeran A. *The ZEBRA MOZART Programme*. ZEBRA-LMFR-EXP-002. International Handbook of Evaluated Reactor Physics Benchmark Experiments, NEA OECD, 2013.
 9. Kusters H., Pilati S. The present accuracy of physics characteristics of unirradiated fast reactor cores. *Progress in Nuclear Energy*. 1985, v. 16, no. 3, pp. 201-229.
 10. Le Sage L.G., Lineberry M.J., McFarlane H.F. Current status of fast reactor physics reactivity coefficients. *Progress in Nuclear Energy*. 1985, v. 16, no. 3, pp. 231-250.
 11. Bednyakov S.M., Golubev B.N., Dulin V.A., Kozlovtssev V.G., Mamontov V.F. Experimental justification of methods for assessing the critical perturbations of fast assemblies with small samples. *Atomnaya Energiya*. 1988, v. 65, no. 6, pp. 426-430 (in Russian).
 12. Belov S.P., Dulin V.A., Zhukov A.V., Kuzin E.N., Mozhaev E.K., Sitnikov N.I., Tsibulya A.M., Shapar A.N., Seifert E., Kuntsman B., Heinzelman B. Effects of small heterogeneity of fast critical assemblies. *Atomnaya Energiya*. 1989, v. 66, no. 1, pp. 13-17 (in Russian).
 13. Leppaanen J. *Serpent – a Continuous-Energy Monte Carlo Reactor Physics Burnup Calculation Code*. User's Manual. VTT Technical Research Centre of Finland, 2015.
 14. Leppaanen J., Viitanen T. *Cross section libraries for Serpent 1.1.7.*, Espoo, VTT Technical Research Centre of Finland, 2013, 58 p.
 15. Orlov V.V., Smirnov V.S., Filin A.I. Deterministic safety of BREST reactors. *Energiya, Ekonomika, Tekhnologiya, Ecologiya*. 2003, no. 10, pp. 13-20 (in Russian).
 16. Hammel G., Okrent D. *Reactivity Coefficients in Large Fast Nuclear Reactors*. Moscow. Atomizdat Publ., 1975, pp. 69-106 (in Russian).
 17. Available at: <https://www.ippe.ru/nuclear-power/fast-neutron-reactors/122-bn1200-reactor> (accessed May 21, 2019) (in Russian).
 18. Available at: <http://www.innov-rosatom.ru/files/articles/b4589ee208b5b20af9c07c28921d4891.pdf> (accessed May 21, 2019) (in Russian).

Authors

Kazansky Yuri Alexeyevich, Professor, Dr. Sci. (Phys.-Math.)

E-mail: kazansky@iate.obninsk.ru

Karpovich Gleb Vladislavovich, Assistant

E-mail: gleb.karpovich@yandex.ru