

Государственная корпорация по атомной энергии «Росатом»
АО «ГОСУДАРСТВЕННЫЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР РФ —
ФИЗИКО-ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ
имени А. И. ЛЕЙПУНСКОГО»

ФЭИ-3310

Р. А. ШАГИНЯН

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТЕЙ ВОСПРОИЗВЕДЕНИЯ
СПЕКТРАЛЬНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК РЕАКТОРА ВВЭР-С
ТРАДИЦИОННЫМИ СРЕДСТВАМИ БФС**

Обнинск – 2025

УДК 621.039.51

Шагинян Р.А. Исследование возможностей воспроизведения спектральных характеристик реактора ВВЭР-С традиционными средствами БФС: Препринт ФЭИ-3310. Обнинск: ГНЦ РФ – ФЭИ, 2025. 23 с.

Ключевые слова: моделирование, БФС, ВВЭР-С, спектр, ячейка, индексы, полиэтилен, блочок

В работе исследуются два подхода к моделированию активной зоны реактора ВВЭР-С традиционными средствами. Первый подход – классический, основывается на полном воспроизведении материального состава относительного исследуемого объекта. Второй подход представляет собой подбор ячейки, которая будет наиболее близко соответствовать спектральным характеристикам реактора ВВЭР-С.

В результате проведенных исследований сделан вывод о том, что использование первого метода нецелесообразно в отношении реактора с изменяющимся водо-топливным отношением, в то время как второй метод оказался положительным и рекомендован к использованию для моделирования на БФС традиционными средствами.

Shaginyan R.A. Investigation of the possibilities of reproducing the spectral characteristics of the VVER-S reactor by traditional BFS means: Preprint FEI-3310. Obninsk, IPPE Publ., 2025. 23 p.

Keywords: modeling, BFS, VVER-S, spectrum, cell, indexes, polyethylene, pellet

This paper researches two approaches to VVER-S reactor core modeling by conventional means. The first approach is classical. It is based on a complete reproduction of the material composition of the object under study. The second approach is the selection of a cell that will most closely match the spectral characteristics of the VVER-S reactor.

As a result of this research, it was concluded that the use of the first method is inappropriate for a reactor with a changing water-fuel ratio, while the second method turns out to be positive and recommended for use for modeling on BFS by conventional means.

Введение

Особенность реактора ВВЭР-С [1], [2] обусловлена лежащим в основе его работы новым физическим принципом: возможностью воздействовать на реактивность реактора путем изменения водо-топливного отношения и, соответственно, изменением спектра реактора. Другой особенностью моделируемого реактора является применение в его загрузке уран-плутониевого топлива с использованием плутония из ОЯТ ВВЭР, которое само по себе обуславливает несколько более жесткий, по сравнению с урановым топливом, спектр нейтронов, формирование которого происходит путем реализации сложной совокупности физических процессов.

В настоящее время экспериментальное моделирование активной зоны (АЗ) реактора ВВЭР-С возможно лишь на критическом стенде БФС-1 в АО «ГНЦ РФ – ФЭИ» (Обнинск). Более того, существует положительный опыт использования этого стенда для моделирования АЗ легководных реакторов с МОКС-топливом. В конце 90-х и в начале 2000-х на этом стенде была осуществлена программа предварительных экспериментов в обоснование постановки в активную зону реактора типа ВВЭР-1000 МОКС-топлива с плутонием оружейного качества. В рамках этой программы было осуществлено два этапа экспериментального моделирования: на первом этапе стандартными средствами БФС были реализованы сборки БФС-57 и БФС-59, на которых была продемонстрирована возможность моделирования на стенде БФС реактора с тепловым спектром нейтронов и выполнение предварительной программы измерений, нацеленной на отработку методов измерений в тепловом спектре. На втором этапе экспериментального моделирования в центре сборки БФС-93, собранной на стенде БФС-1, был сформирован фрагмент типичной для реактора ВВЭР решетки ТВЭЛов [3]–[7].

В отличие от штатной АЗ реактора ВВЭР, моделирование АЗ реактора ВВЭР-С необходимо проводить как минимум для двух его состояний:

- 1) На начало кампании, когда вытеснители полностью погружены в направляющие каналы активной зоны.
- 2) На конец кампании, когда вытеснители полностью извлечены из направляющих каналов активной зоны.

Принципиальным отличием состояния 1 от состояния 2 является спектр нейтронов в активной зоне, смещенный в тепловую область в состоянии 2 по сравнению с состоянием 1. Соответственно, спектральные индексы для этих двух состояний будут существенным образом различаться.

С точки зрения формирования критического состояния в условиях стенда БФС, большим запасом реактивности обладает состояние, в котором

вытеснители полностью выведены из активной зоны и спектр смещен в тепловую область.

Таким образом, необходимо смоделировать с использованием традиционных средств стенда два состояния АЗ реактора ВВЭР-С. Моделирование может быть проведено двумя принципиально отличающимися друг от друга способами.

Первый способ заключается в использовании классического подхода для моделирования активных зон реакторов – подход с сохранением материального баланса. Ячейка подбирается таким образом, чтобы при вводе/выводе полиэтиленовых прутков воссоздать спектральные условия, соответствующие вводу/выводу вытеснителей в ТВС ВВЭР-С.

Второй способ заключается в подборе элементарной ячейки для состояния с полностью погруженными вытеснителями (с более жестким спектром нейтронов). При этом ячейка должна быть выбрана таким образом, чтобы размещение полиэтиленовых прутков в межтрубном пространстве драйвера позволяло бы переходить к спектру и спектральным индексам реактора ВВЭР-С, находящимся в состоянии с полностью выведенными вытеснителями. При этом вводимая положительная реактивность, обусловленная введением полиэтиленовых прутков, может быть скомпенсирована введением в заранее определенные пустые трубы постоянных компенсаторов реактивности.

Как упоминалось выше, серии экспериментов БФС-93 предшествовали 2 сборки с использованием традиционного таблеточного моделирования для демонстрации возможности моделирования АЗ реактора с тепловым спектром. В данном случае трубы с подобранным составом ячейки могут быть использованы в качестве драйвера, окружающего легководную центральную вставку в центре стенда БФС с твэлами из МОКС-топлива. В этом случае замена воды на полиэтилен осуществляется только во внешних слоях сборки стенда БФС, в которых располагаются штатные трубы стенда, в то время как в центральной части стенда располагается экспериментальное устройство из заполненного водой бака с твэлами.

В данном исследовании рассматривается возможность моделирования реактора ВВЭР-С, охлаждаемого водой под давлением с применением спектрального регулирования, с использованием только традиционных средств, имеющих на стенде БФС-1 – блочками и таблетками делящихся, конструкционных и замедляющих материалов, гетерогенно размещенными в трубах. Водный теплоноситель при этом моделируется таблетками полиэтилена, входящими в состав ячеек труб стенда БФС или полиэтиленовыми прутками, вставляемыми в межтрубные зазоры.

1. Моделирование бесконечной решетки ТВС ВВЭР-С

Для подбора элементарной ячейки необходимо получить спектр нейтронов и спектральные индексы реактора ВВЭР-С, находящегося в различных состояниях, с целью дальнейшего определения представительности результатов моделирования для обоснования использования программных средств для расчета такого реактора.

Для исследований произведен расчет коэффициентов размножения и спектральных индексов для холодного состояния ТВС ВВЭР-С [8] в бесконечной среде при полностью извлеченных вытеснителях (см. рис. 1). Результаты представлены в таблицах 1 и 2. Расчет усредненных по всей ТВС спектральных индексов проводился с применением программного комплекса MCNP [9]. Данные о ядерных сечениях взяты из библиотеки, в основу которой положены данные РОСФОНДа-2010 [10].

Так как традиционное моделирование на критическом стенде БФС подразумевает использование полиэтилена вместо воды, необходимо дополнительно рассчитать критичность и спектральные индексы для холодного состояния ТВС ВВЭР-С в бесконечной среде с заменой воды на полиэтилен.

Сопоставление замедлителей в первую очередь обусловлено тем, что в данный момент прямая возможность использования воды на стенде БФС отсутствует, так как стенд изначально подразумевался для моделирования реакторов с быстрым спектром, где гетерогенные эффекты в значительной степе-

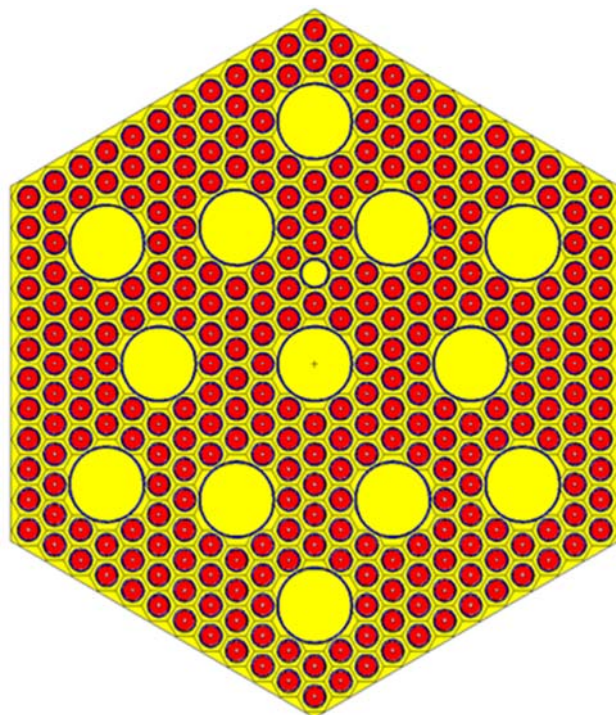


Рис. 1. Модель ТВС ВВЭР-С без вытеснителей

ни меньше, нежели в тепловых. Во-вторых, данные исследования могут послужить основой в обоснование применения центральной вставки с легкой водой на БФС.

Таблица 1. Коэффициент размножения бесконечной решетки (k_{∞}) ТВС реактора ВВЭР-С в холодном состоянии без вытеснителей

MCNP (РОСФОНД 2010) CH ₂	MCNP (РОСФОНД 2010) H ₂ O
1,30281	1,28145

Таблица 2. Усредненные по ТВС (ВВЭР-С) спектральные индексы в холодном состоянии без вытеснителей

Спектральные индексы	MCNP (РОСФОНД 2010) H ₂ O	MCNP (РОСФОНД 2010) CH ₂	Отклонение H ₂ O/CH ₂ , %
F/F			
²³⁸ U/ ²³⁵ U	2,62E-03	2,13E-03	22,96
²³⁹ Pu/ ²³⁵ U	1,82E+00	1,81E+00	0,45
²³⁸ Pu/ ²³⁹ Pu	3,38E-02	3,04E-02	11,25
²³⁷ Np/ ²³⁹ Pu	7,35E-03	6,00E-03	22,54
²⁴⁰ Pu/ ²³⁹ Pu	7,90E-03	6,48E-03	21,96
²⁴¹ Am/ ²³⁹ Pu	1,32E-02	1,16E-02	13,75
²⁴³ Am/ ²³⁹ Pu	6,14E-03	5,06E-03	21,29
C/F			
²³⁸ U/ ²³⁵ U	1,07E-01	9,07E-02	17,95
²³⁷ Np/ ²³⁹ Pu	4,26E-01	3,85E-01	10,73
¹⁹⁷ Au/ ²³⁹ Pu	6,25E-01	5,32E-01	17,56

Из таблиц 1 и 2 видно, что значение k_{∞} для модели с полиэтиленом в качестве замедлителя больше аналогичного для модели с водой на 1,28 % $\Delta k/k$, и отклонение более чем на 20 % наблюдается для четырех спектральных индексов. Такие отличия объясняются различными замедляющими свойствами воды и полиэтилена. Замена воды на полиэтилен при одинаковых геометрических параметрах не дает идентичные спектральные характеристики. Однако изменение геометрической структуры, в случае применения полиэтилена, может позволить приблизиться к спектральным характеристикам ТВС с водой.

Также произведен расчет k_{∞} и спектральных индексов для холодного состояния ТВС ВВЭР-С в бесконечной среде при полностью погруженных в направляющие каналы вытеснителях (см. рис. 2). Результаты расчетов представлены в таблицах 3 и 4.

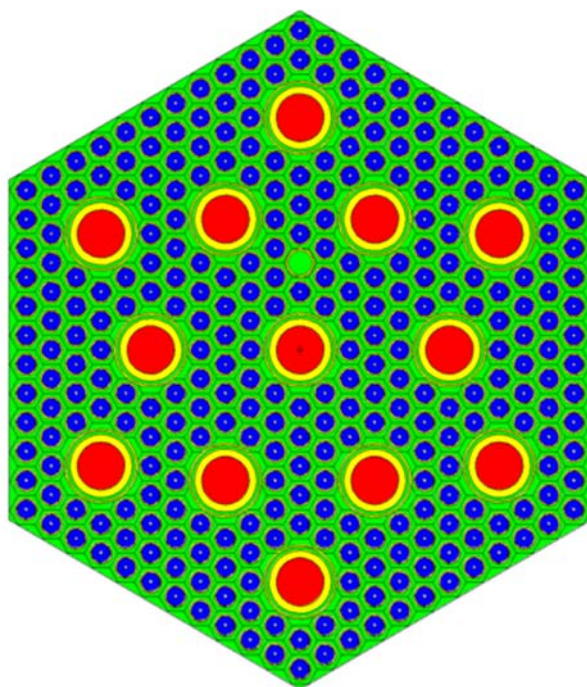


Рис. 2. Модель ТВС ВВЭР-С с вытеснителями

Таблица 3. Коэффициент размножения бесконечной решетки ТВС реактора ВВЭР-С в холодном состоянии с полностью погруженными вытеснителями

MCNP (РОСФОНД 2010) CH ₂	MCNP (РОСФОНД 2010) H ₂ O
1,25404	1,21757

Таблица 4. Усредненные по ТВС (ВВЭР-С) в холодном состоянии с полностью погруженными вытеснителями

Спектральные индексы	MCNP (РОСФОНД 2010) H ₂ O	MCNP (РОСФОНД 2010) CH ₂	Отклонение H ₂ O/CH ₂ , %
F/F			
²³⁸ U/ ²³⁵ U	4,10E-03	3,47E-03	17,95
²³⁹ Pu/ ²³⁵ U	1,94E+00	1,97E+00	-1,34
²³⁸ Pu/ ²³⁹ Pu	4,31E-02	3,76E-02	14,39
²³⁷ Np/ ²³⁹ Pu	1,11E-02	9,26E-03	20,25
²⁴⁰ Pu/ ²³⁹ Pu	1,19E-02	9,96E-03	19,66
²⁴¹ Am/ ²³⁹ Pu	1,78E-02	1,57E-02	13,54
²⁴³ Am/ ²³⁹ Pu	9,15E-03	7,70E-03	18,83
C/F			
²³⁸ U/ ²³⁵ U	1,68E-01	1,49E-01	12,77
²³⁷ Np/ ²³⁹ Pu	5,47E-01	4,90E-01	11,67
¹⁹⁷ Au/ ²³⁹ Pu	9,08E-01	7,78E-01	16,75

Как видно из таблиц 3, 4, значение k_{∞} для модели с полиэтиленом больше аналогичного для модели с водой на 2,39 % $\Delta k/k$, для одного спектрального индекса наблюдается отклонение более чем на 20 % при замене воды на полиэтилен.

2. Подбор «универсальной» элементарной ячейки для моделирования АЗ ВВЭР-С в различных состояниях с сохранением материального баланса

Классическим подходом для моделирования активных зон реакторов является подход с сохранением масс материалов. Подбиралась ячейка БФС, состоящая из набора блочков и содержащая в гомогенном представлении наиболее близкое к ТВС количество ядер материалов. Такими блочками были: блочок плутония, блочок обедненного урана и блочок полиэтилена.

Для описанной на рисунке 1 ТВС объемные доли материалов составляли: вода – 0,5686, топливо – 0,2797, оболочки – 0,1277. Как видно, вода занимает более половины ячейки, следовательно, и количество полиэтилена должно быть соответствующим. Чтобы уменьшить количество полиэтиленовых блочков в ячейке, было принято решение размещать полиэтиленовые прутки в межтрубном пространстве, а также выделить отдельные трубы, заполненные только полиэтиленом (имитация заполненных водой направляющих каналов).

Площадь ТВС ВВЭР-С эквивалентна 21 трубе БФС. Для обеспечения симметричности модели ТВС принято решение описывать ее 19 трубами БФС, 4 из которых – трубы с полиэтиленом (объемная доля вытеснителей в ТВС составляет 0,1867). Полученная структура модели ТВС приведена на рисунке 3.

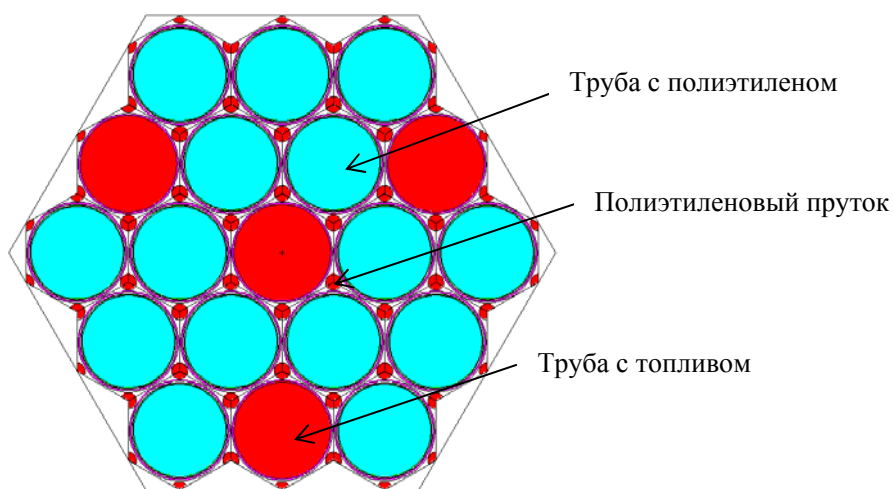


Рис. 3. Описание ТВС ВВЭР-С средствами БФС

При такой структуре модели БФС для сохранения количества ядер материалов на см^3 ячейка из номенклатурных блоков БФС должна быть следующей: 1 блок Pu, 8 блоков UO_2 , 12 блоков полиэтилена.

Полиэтиленовые прутки имеют диаметр 8 мм и размещаются в 6 межтрубных пространствах на одну элементарную ячейку (по вершинам элементарной ячейки). То есть на одну элементарную ячейку максимально может приходиться по два полиэтиленовых стержня (см. рис. 4).

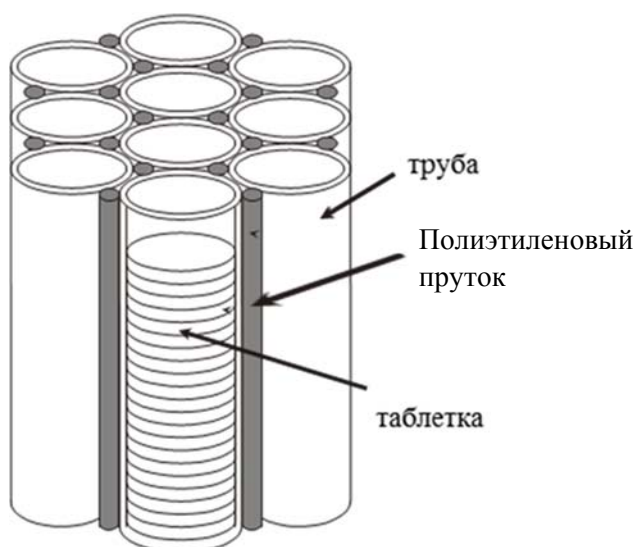


Рис. 4. Расположение полиэтиленовых прутков в межтрубных зазорах

Сравнение соотношений топливных ядер и ядер замедлителя (водорода) в ТВС ВВЭР-С и ее модели (полученной средствами БФС) приведено в таблице 5.

Таблица 5. Отклонение соотношений ядер в ТВС и предложенной структуре БФС

Нуклиды	Отклонение БФС/ТВС, %
Делящиеся	+8,47
Пороговые	+2,76
Водород	-8,44

На рисунке 5 приводится спектр нейтронов, а в таблице 6 — значения спектральных индексов бесконечных моделей гомогенной ТВС и гомогенной структуры БФС, которая представляет собой шестигранную призму высотой 13,724 см (сумма высот блоков) и размером «под ключ» 22,23 см (сумма площадей 19 труб БФС с околотрубным пространством).

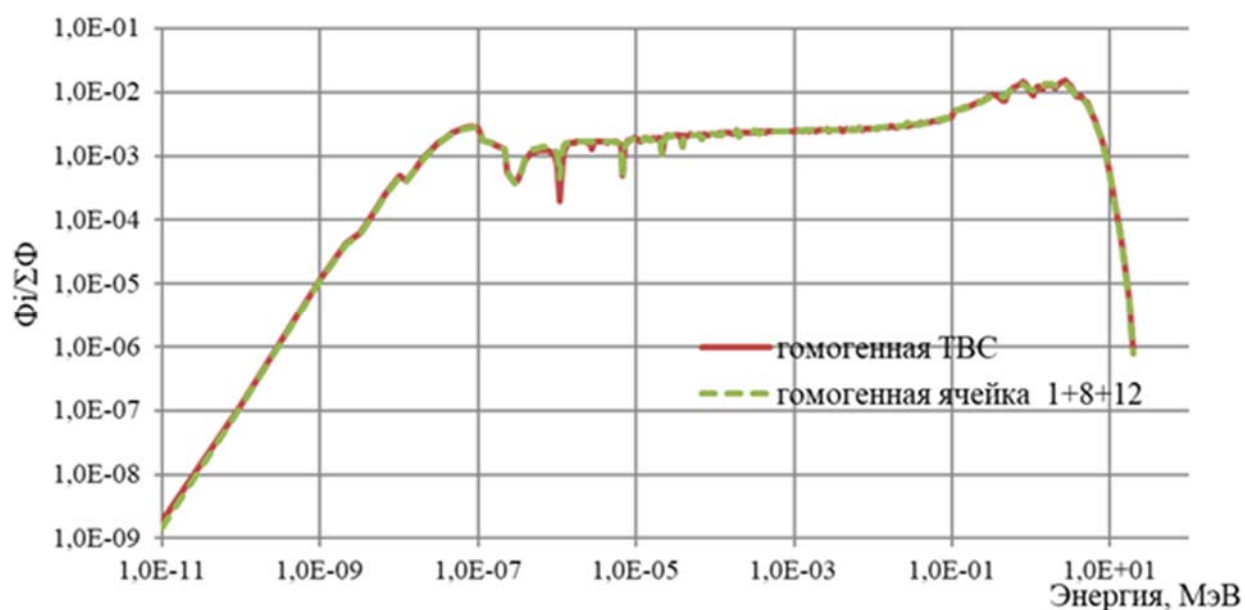


Рис. 5. Спектр нейтронов для гомогенной ТВС ВВЭР-С
и структуры БФС

Таблица 6. Спектральные индексы для гомогенной ТВС и гомогенной структуры БФС

Расчетные величины	Гомогенная ТВС	Гомогенная структура БФС	Отклонение (БФС-ТВС)/ТВС, %
k_{∞}	1,12279	1,21375	
Спектральные индексы	F/F		
$^{238}\text{U}/^{235}\text{U}$	5,48E-03	5,35E-03	-2,4
$^{239}\text{Pu}/^{235}\text{U}$	1,80E+00	1,79E+00	-0,6
$^{238}\text{Pu}/^{239}\text{Pu}$	5,42E-02	5,45E-02	0,5
$^{237}\text{Np}/^{239}\text{Pu}$	1,54E-02	1,54E-02	-0,1
$^{240}\text{Pu}/^{239}\text{Pu}$	1,59E-02	1,62E-02	1,7
$^{241}\text{Am}/^{239}\text{Pu}$	2,25E-02	2,28E-02	1,5
$^{243}\text{Am}/^{239}\text{Pu}$	1,27E-02	1,28E-02	0,3
	C/F		
$^{238}\text{U}/^{235}\text{U}$	5,43E-02	5,29E-02	-2,5
$^{237}\text{Np}/^{239}\text{Pu}$	6,42E-01	6,64E-01	3,4
$^{197}\text{Au}/^{239}\text{Pu}$	1,13E+00	1,13E+00	-0,2

Данные рисунка 5 и таблицы 6 показывают хорошее совпадение (отклонения не более 3,5 %) как спектра нейтронов, так и расчетных характеристик гомогенной ТВС и гомогенной структуры модели БФС.

2.1 Гетерогенное представление. Ячейка 1-8-12

Теперь сравним спектр и характеристики бесконечных моделей ТВС ВВЭР-С и ее модели на БФС при реальном (гетерогенном) описании их конструкций. Структура ячеек типа 1-8-12, которыми заполнялись топливные трубы БФС, показана на рисунке 6.

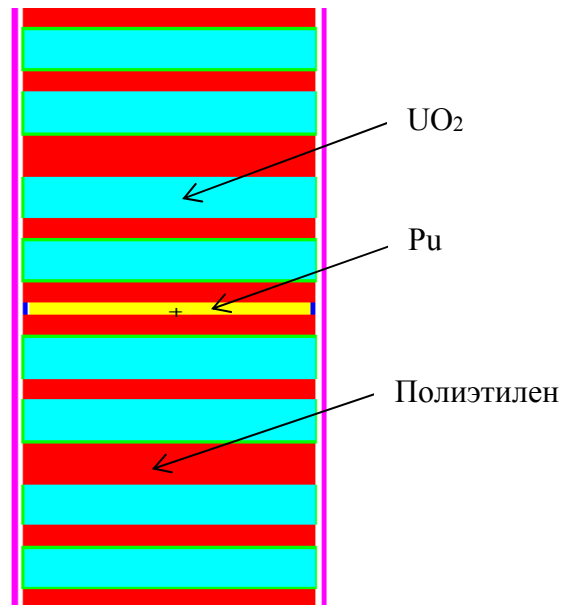


Рис. 6. Ячейка БФС 1-8-12: 1 блок Pu (желтый), 8 блоков UO_2 (голубой), 12 блоков полиэтилена (красный)

На рисунке 7 приводятся спектры гетерогенной ТВС (средние по ТВС ВВЭР-С) и гетерогенной структуры БФС (также средние), а в таблице 7 – спектральные индексы.

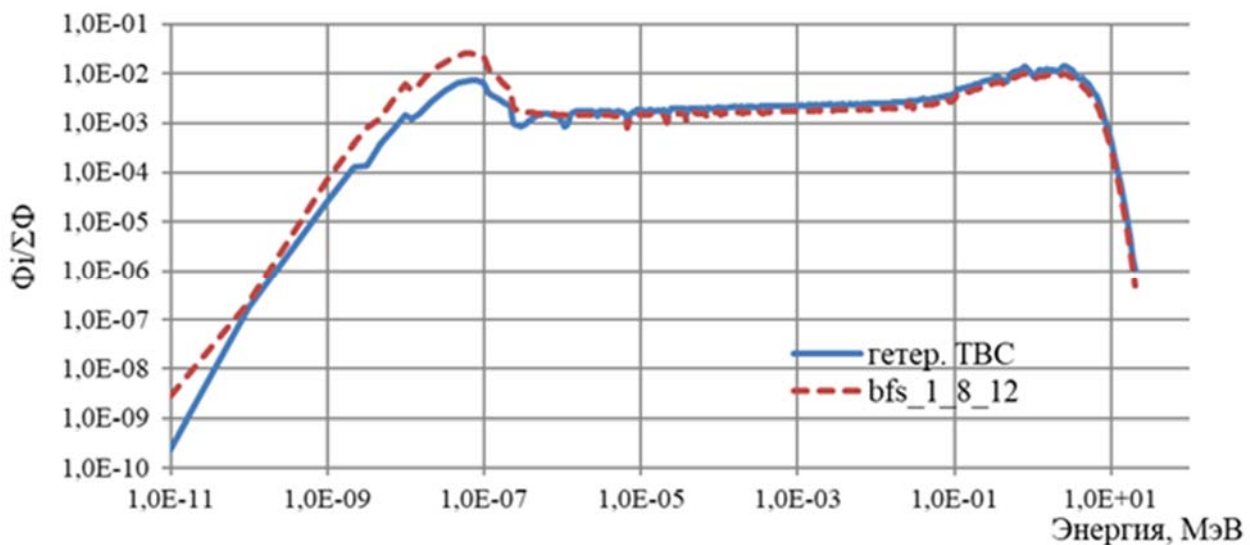


Рис. 7. Средние по гетерогенной ТВС и структуре БФС спектры нейтронов

Таблица 7. Спектральные индексы для гетерогенной ТВС и структуры БФС

Расчетные величины	Гетерогенная ТВС	Гетерогенная структура БФС 1-8-12	Отклонение (БФС-ТВС)/ТВС, %
k_{∞}	1,28145	0,80596	
Спектральные индексы	F/F		
$^{238}\text{U}/^{235}\text{U}$	2,62E-03	6,33E-04	-75,9
$^{239}\text{Pu}/^{235}\text{U}$	1,82E+00	1,69E+00	-7,2
$^{238}\text{Pu}/^{239}\text{Pu}$	3,38E-02	2,21E-02	-34,6
$^{237}\text{Np}/^{239}\text{Pu}$	7,35E-03	1,99E-03	-72,9
$^{240}\text{Pu}/^{239}\text{Pu}$	7,90E-03	2,30E-03	-70,9
$^{241}\text{Am}/^{239}\text{Pu}$	1,32E-02	6,73E-03	-49,2
$^{243}\text{Am}/^{239}\text{Pu}$	6,14E-03	1,71E-03	-72,1
	C/F		
$^{238}\text{U}/^{235}\text{U}$	1,07E-01	3,25E-02	-69,7
$^{237}\text{Np}/^{239}\text{Pu}$	4,26E-01	2,67E-01	-37,4
$^{197}\text{Au}/^{239}\text{Pu}$	6,25E-01	2,56E-01	-59,1

Результаты показывают существенную разницу в спектрах (особенно в тепловой области – спектр БФС оказался «излишне» тепловым) и значительные (в некоторых случаях более 70 %) расхождения спектральных индексов для выбранной гетерогенной структуры БФС и гетерогенно описанной ТВС ВВЭР-С.

Таким образом, использование классического подхода – воспроизведение материального состава, ТВС реактора средствами БФС в данном случае не привело к положительному результату, эффекты гетерогенности на водороде оказались значительными.

2.2 Гетерогенное представление. Ячейка 1-8-0

Для того чтобы минимизировать отклонения, приведенные в предыдущем разделе, связанные со всплеском в тепловой области (рис. 7), проведем изменения состава ячейки посредством уменьшения количества полиэтилена. Наилучший результат показало полное его исключение из топливных труб, при этом он останется в межтрубном пространстве и в четырех полиэтиленовых трубах (19-трубное описание ТВС при этом не меняется). Суммарная доля полиэтилена в такой модели БФС снижается с 0,5686 до 0,446. В результате подобрана ячейка БФС, состоящая из одного блочка Pu и восьми блочков UO_2 , без полиэтилена как показано на рисунке 8.

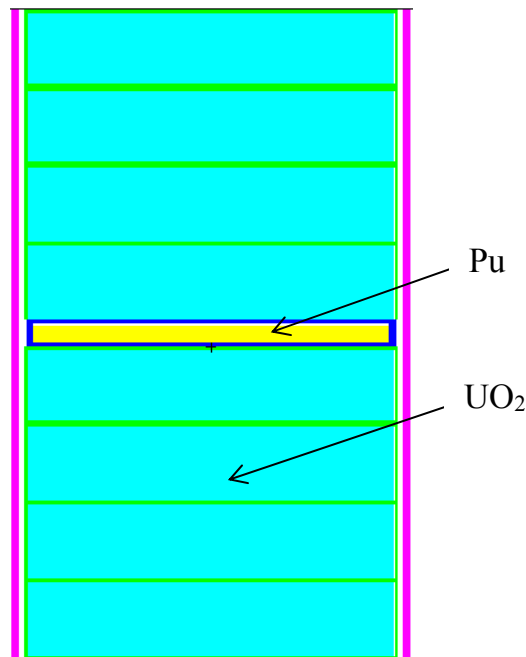


Рис. 8. Ячейка БФС 1-8-0: 1 блок Pu (желтый)
и 8 блоков UO_2 (голубой)

На рисунке 9 приведены спектры гетерогенной ТВС (средние по ТВС) и гетерогенной структуры БФС (также средние) с новой ячейкой, а в таблице 8 – спектральные индексы.

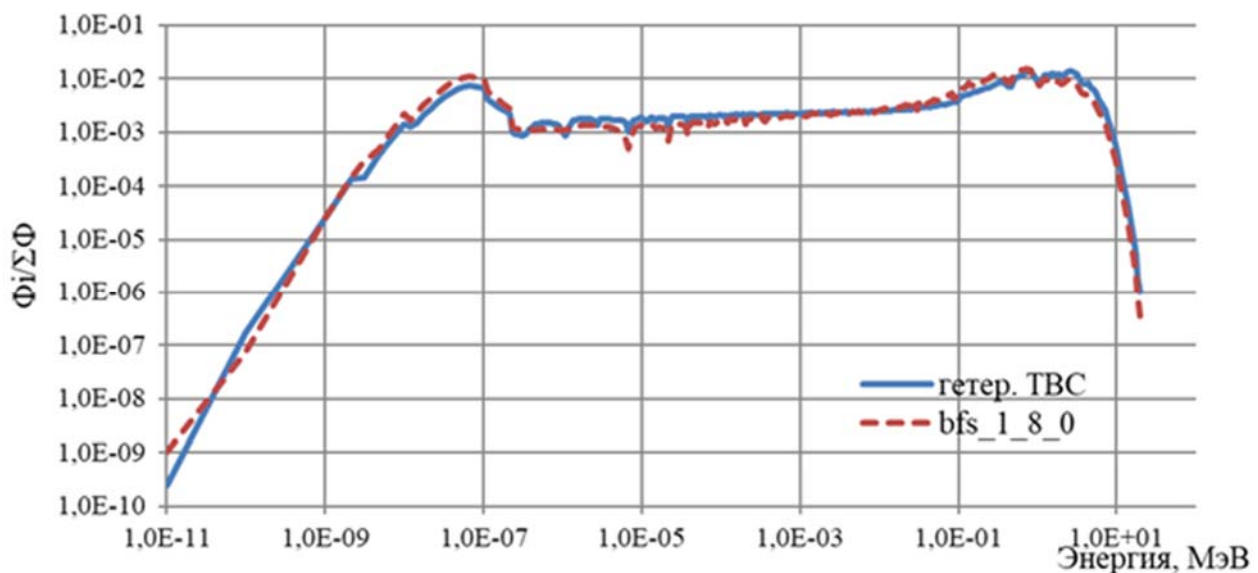


Рис. 9. Средние по гетерогенной ТВС и структуре БФС
спектры нейтронов

Можно видеть, что с такой ячейкой средний спектр БФС стал гораздо ближе к среднему расчетному спектру в ТВС, а расхождения спектральных индексов снизились с 70 до 55 %.

Таблица 8. Спектральные индексы для гетерогенной ТВС и структуры БФС

Расчетные величины	Гетерогенная ТВС	Гетерогенная структура БФС	Отклонение (БФС-ТВС)/ТВС, %
k_{∞}	1,28145	0,99418	
Спектральные индексы	F/F		
$^{238}\text{U}/^{235}\text{U}$	2,62E-03	1,32E-03	-49,8
$^{239}\text{Pu}/^{235}\text{U}$	1,82E+00	1,80E+00	-0,92
$^{238}\text{Pu}/^{239}\text{Pu}$	3,38E-02	2,81E-02	-16,88
$^{237}\text{Np}/^{239}\text{Pu}$	7,35E-03	4,45E-03	-39,51
$^{240}\text{Pu}/^{239}\text{Pu}$	7,90E-03	4,98E-03	-37,01
$^{241}\text{Am}/^{239}\text{Pu}$	1,32E-02	9,29E-03	-29,85
$^{243}\text{Am}/^{239}\text{Pu}$	6,14E-03	3,42E-03	-44,26
	C/F		
$^{238}\text{U}/^{235}\text{U}$	1,07E-01	4,75E-02	-55,6
$^{237}\text{Np}/^{239}\text{Pu}$	4,26E-01	3,17E-01	-25,7
$^{197}\text{Au}/^{239}\text{Pu}$	6,25E-01	3,49E-01	-44,2

Теперь сравним спектры нейтронов в воде центрального направляющего канала ТВС и в полиэтилене центральной трубы структуры БФС, а также в топливе ТВС и топливных сердечниках блочков Pu и UO_2 ячейки 1-8-0 как показано на рисунках 10 и 11.

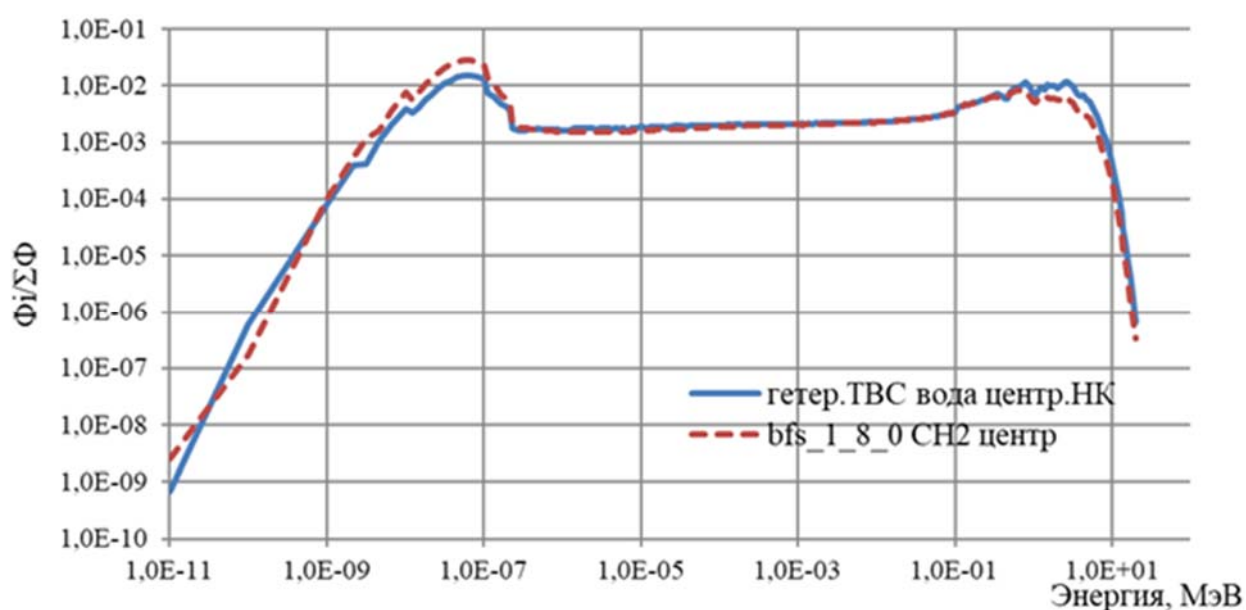


Рис. 10. Спектры нейтронов в воде центрального канала ТВС и полиэтилене центральной трубы структуры БФС

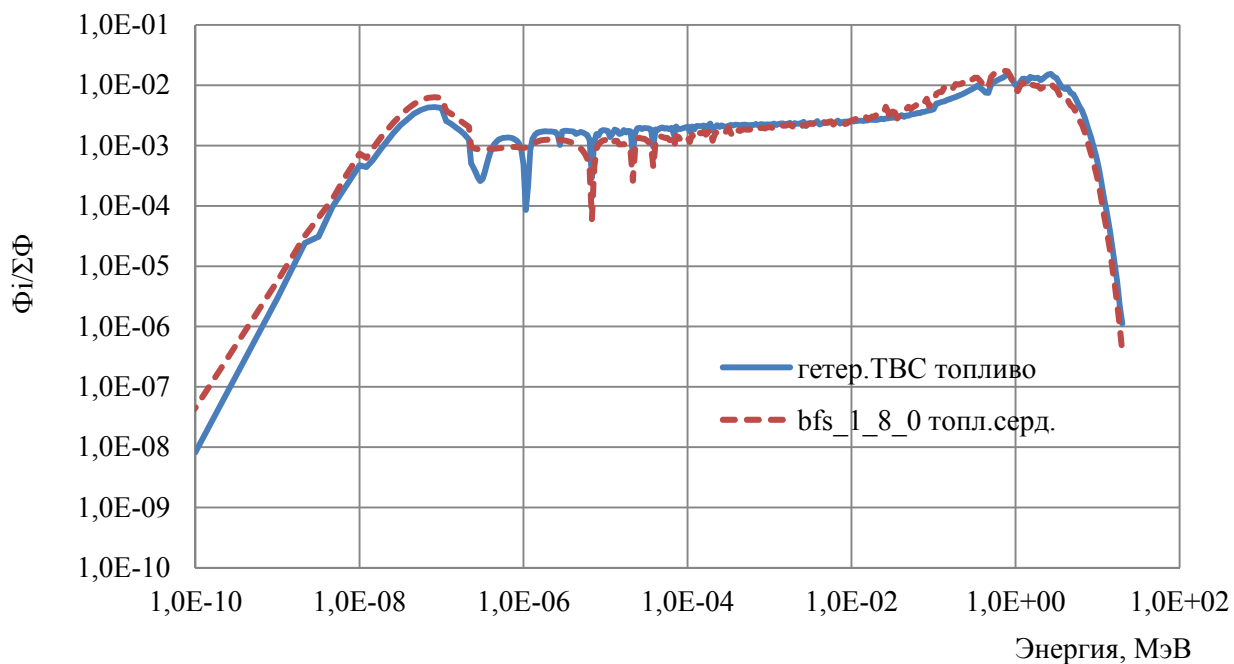


Рис. 11. Спектры нейтронов в топливе ТВС и сердечниках блочков структуры БФС

Из рисунков 9–11 видно, что ячейка 1-8-0 (1 блочок плутония, 8 блочков урана без полиэтилена) значительно лучше воспроизводит спектр нейтронов, характерный для пучка твэлов в ТВС ВВЭР-С, хотя спектр по-прежнему остается избыточно мягким. В спектральных индексах по-прежнему наблюдаются расхождения, но уже меньшие (немного более 50 %). Но самое главное отношение F_{Pu-239}/F_{U-235} в ТВС ВВЭР-С и структуре БФС практически совпадает.

3. Подбор «универсальной» элементарной ячейки для моделирования ВВЭР-С в различных состояниях

Проведенные расчетные исследования показали, что использование классического подхода моделирования, а именно соответствие материальных соотношений в исследуемом объекте и его модели, не подходит для установки с тепловым спектром, т. к. при таком способе моделирования не удастся достоверно воспроизвести спектральные характеристики установки.

По этим причинам были сформулированы следующие критерии к подбору ячейки трубы стенда БФС:

- спектральные индексы ячейки должны соответствовать спектральным индексам реактора ВВЭР-С в состоянии с полностью погруженными вытеснителями;

– спектральные индексы ячейки с размещенными в межтрубном пространстве полиэтиленовыми прутками должны соответствовать спектральным индексам реактора ВВЭР-С в состоянии с полностью выведенными вытеснителями.

Специалистами из НИЦ «Курчатовский институт» была предложена и специалистами из АО «ГНЦ РФ – ФЭИ» модифицирована следующая композиция, представленная на рисунке 12.

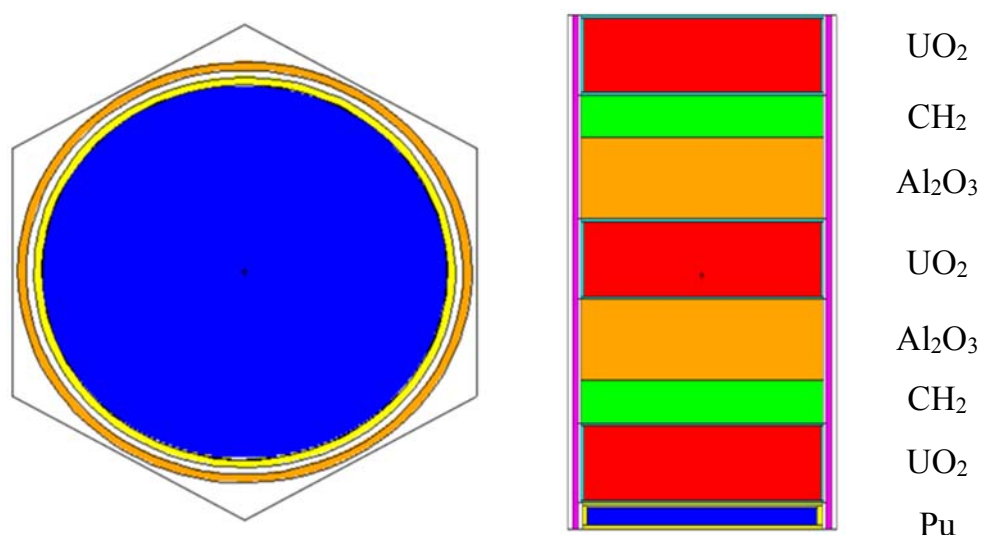


Рис. 12. Элементарная ячейка в трубе стенда БФС («универсальная» ячейка). Состав: 1 Pu (синий), 3 UO₂ (красный), 2 CH₂ (зеленый), 2 Al₂O₃ (оранжевый)

В данной элементарной ячейке блок плутония оказывается окруженным блоками обедненного урана. Соотношение блоков плутония и обедненного урана (1/3) наиболее близко к содержанию плутония в топливе реактора ВВЭР-С. Алюминиевые блочки необходимы для увеличения высоты ячейки с целью повышения эффективности полиэтиленовых прутков, располагающихся в межтрубном пространстве. Также с помощью алюминия проводилась корректировка спектра и спектральных индексов, поскольку его влияние не настолько велико, как влияние полиэтилена.

По высоте трубы расположены 15 элементарных ячеек, сверху для симметрии расположен блок (таблетка) Pu.

Произведен расчет спектра нейтронов и спектральных индексов в центральной части трубы стенда и проведено его сравнение с ТВС реактора ВВЭР-С с полностью погруженными вытеснителями. Результаты представлены на рисунке 13 и в таблице 9 соответственно.

Таблица 9. Сравнение спектральных индексов ВВЭР-С с погруженными вытеснителями и спектральными индексами трубы стенда без полиэтиленовых прутков

Спектральные индексы	ТВС с погруженными вытеснителями	БФС без полиэтиленовых прутков	Отклонение (БФС-ТВС)/ТВС, %
F/F			
$^{238}\text{U}/^{235}\text{U}$	4,10E-03	3,49E-03	-14,91
$^{239}\text{Pu}/^{235}\text{U}$	1,94E+00	2,14E+00	10,06
$^{238}\text{Pu}/^{239}\text{Pu}$	4,31E-02	4,36E-02	1,26
$^{237}\text{Np}/^{239}\text{Pu}$	1,11E-02	1,00E-02	-10,09
$^{240}\text{Pu}/^{239}\text{Pu}$	1,19E-02	1,12E-02	-5,69
$^{241}\text{Am}/^{239}\text{Pu}$	1,78E-02	1,58E-02	-10,87
$^{243}\text{Am}/^{239}\text{Pu}$	9,15E-03	7,69E-03	-15,96
C/F			
$^{238}\text{U}/^{235}\text{U}$	1,68E-01	1,67E-01	-0,43
$^{237}\text{Np}/^{239}\text{Pu}$	5,47E-01	4,83E-01	-11,80
$^{197}\text{Au}/^{239}\text{Pu}$	9,08E-01	7,40E-01	-18,51

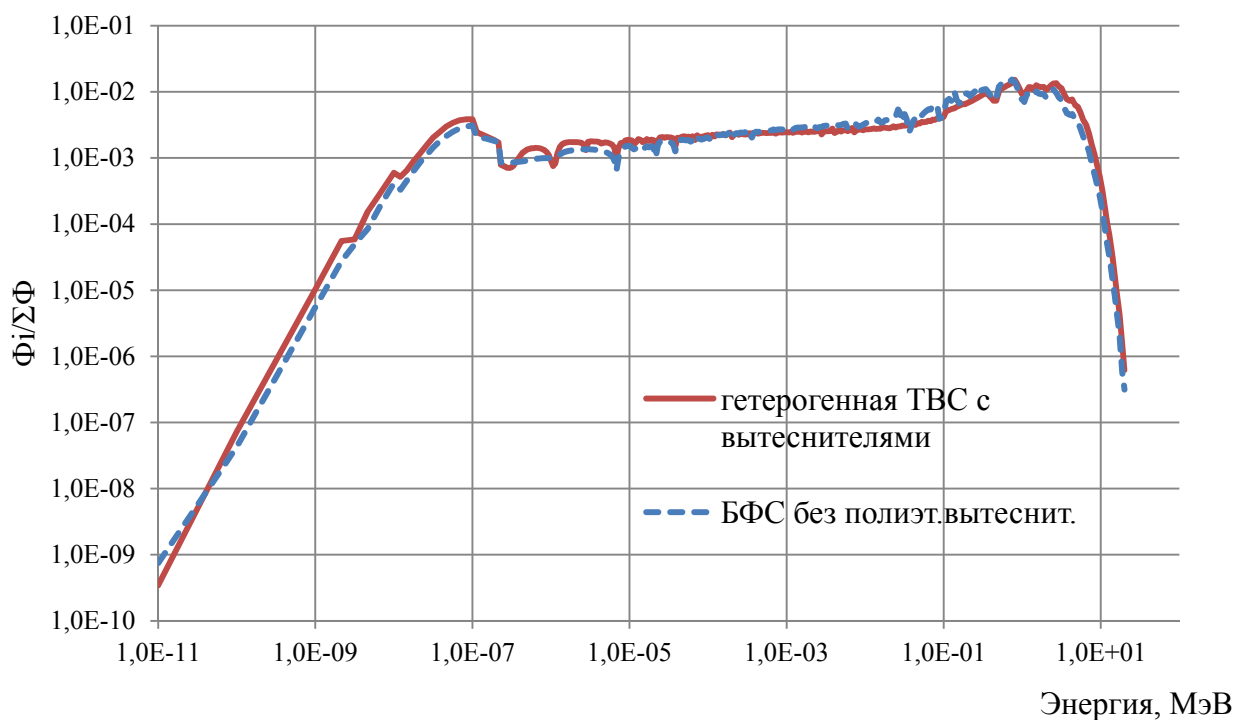


Рис. 13. Спектры нейтронов в композиции БФС без полиэтиленовых прутков и в гетерогенной ТВС с вытеснителями

Из результатов (табл. 9) отмечается значительное сходство по спектральным параметрам, по сравнению с вариантами ячеек: 1-8-12, 1-8-0. Как видно из полученных результатов, спектр и спектральные индексы близки к спектру и спектральным индексам реактора ВВЭР-С с полностью погруженными в направляющий канал вытеснителями. Расхождения в спектральных индексах составляют менее 10 %, за исключением отношений $^{239}\text{Pu}/^{235}\text{U}$ и $^{238}\text{U}/^{235}\text{U}$.

На следующем этапе рассмотрена возможность использования данной ячейки (универсальной ячейки) для моделирования реактора ВВЭР-С, находящегося в состоянии с полностью выведенными вытеснителями. При этом положительная реактивность, обусловленная введением полиэтиленовых прутков, компенсируется установкой борных стержней в заранее определенные пустые трубы.

Согласно рисункам 4 и 14 в этом случае заполнены все межтрубные зазоры.

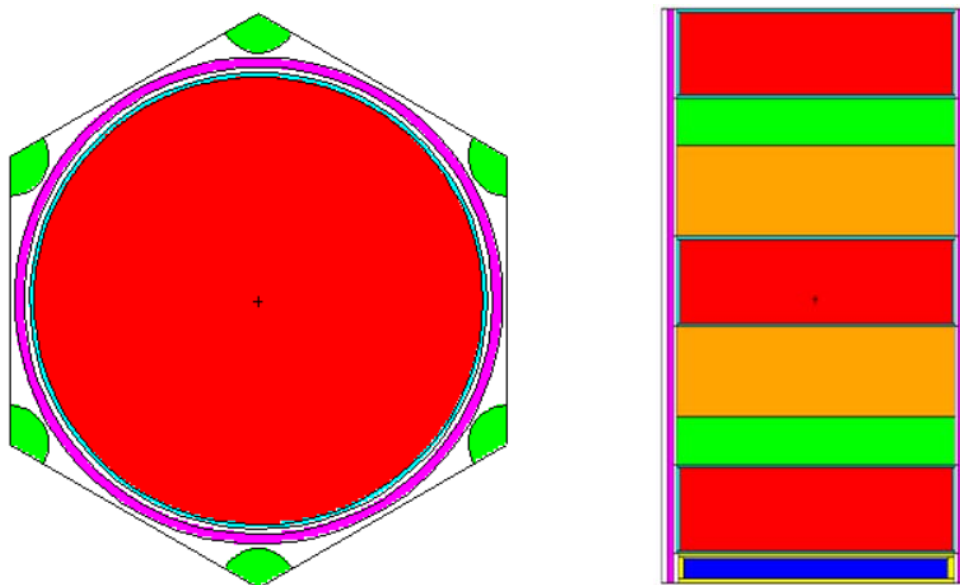


Рис. 14. Элементарная ячейка в трубе драйвера с полиэтиленовыми прутками в межтрубном пространстве («универсальная» ячейка)

Произведены расчеты спектра нейтронов и спектральных индексов. Проведено их сравнение с реактором ВВЭР-С с полностью выведенными вытеснителями из направляющих каналов. Результаты представлены в таблице 10 и на рисунке 15 соответственно.

Таблица 10. Сравнение спектральных индексов ВВЭР-С с выведенными вытеснителями и спектральными индексами трубы стенда с размещенными полиэтиленовыми прутками в межтрубном пространстве

Спектральные индексы	ТВС без вытеснителей	БФС с полиэтиленовыми вытеснителями	Отклонение (БФС-ТВС)/ТВС, %
F/F			
$^{238}\text{U}/^{235}\text{U}$	2,62E-03	2,53E-03	-3,75
$^{239}\text{Pu}/^{235}\text{U}$	1,82E+00	2,11E+00	15,91
$^{238}\text{Pu}/^{239}\text{Pu}$	3,38E-02	3,40E-02	0,65
$^{237}\text{Np}/^{239}\text{Pu}$	7,35E-03	7,13E-03	-3,06
$^{240}\text{Pu}/^{239}\text{Pu}$	7,90E-03	8,04E-03	1,81
$^{241}\text{Am}/^{239}\text{Pu}$	1,32E-02	1,29E-02	-2,81
$^{243}\text{Am}/^{239}\text{Pu}$	6,14E-03	5,63E-03	-8,35
C/F			
$^{238}\text{U}/^{235}\text{U}$	1,07E-01	1,31E-01	22,80
$^{237}\text{Np}/^{239}\text{Pu}$	4,26E-01	4,13E-01	-3,15
$^{197}\text{Au}/^{239}\text{Pu}$	6,25E-01	6,03E-01	-3,59

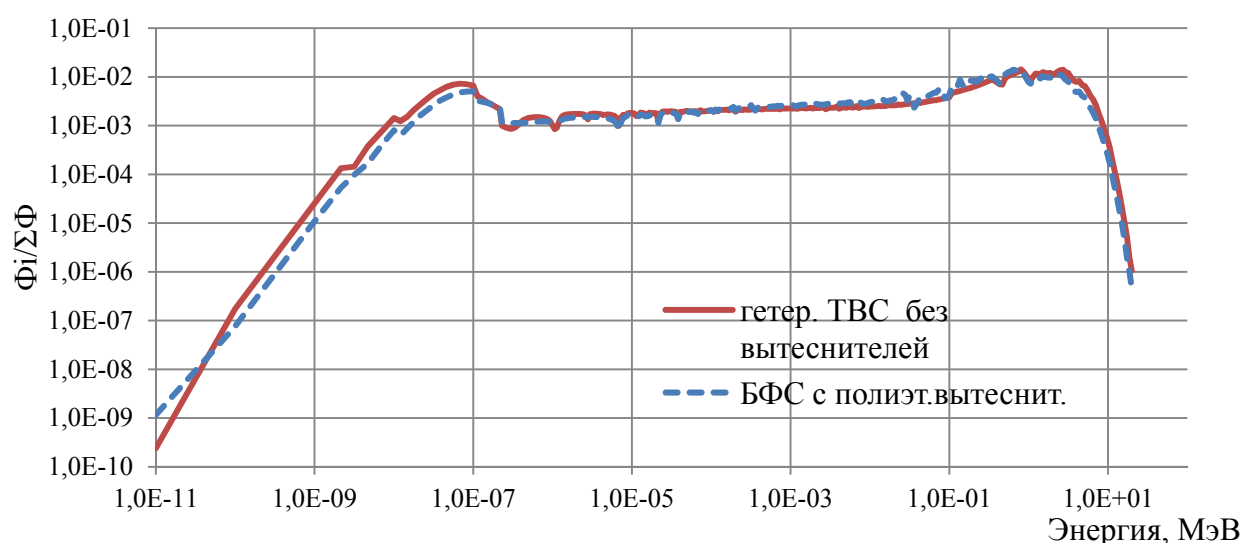


Рис. 15. Спектры нейтронов в композиции БФС с полиэтиленовыми прутками и в гетерогенной ТВС без вытеснителей

Как видно из полученных результатов, спектральные индексы лучше согласуются с ТВС реактора ВВЭР-С с полностью выведенными из направляющих каналов вытеснителями, по сравнению с ячейками: 1-8-12, 1-8-0. Расхождения в спектральных индексах составляют менее 10 %, за исключением отношений $^{239}\text{Pu}/^{235}\text{U}$ и $^{238}\text{U}/^{235}\text{U}$.

Заключение

В ходе проведенных исследований рассмотрены два способа моделирования реактора ВВЭР-С со спектральным регулированием традиционными средствами стенда БФС-1.

Первый способ предусматривает использование классического подхода моделирования – воспроизведение материальных соотношений между исследуемым объектом и его моделью. Проведенные расчетные исследования показали, что использование классического подхода моделирования не подходит для установки с тепловым спектром, т. к. при таком способе моделирования не удастся достоверно воспроизвести спектральные характеристики установки.

Второй способ предполагает создание универсальной ячейки, позволяющей сохранить спектральные характеристики исследуемой установки в двух состояниях – с погруженными и выведенными вытеснителями. Изменение водно-топливного отношения в этом случае регулируется установкой или удалением полиэтиленовых прутков в межтрубные зазоры. Универсальность ячейки позволяет существенно снизить количество операций по перебору труб стенда БФС при переходе от одной модели к другой.

При применении второго способа обеспечено получение спектральных индексов близких по величине к спектральным индексам бесконечной решетки ВВЭР-С в состояниях с введенными и выведенными вытеснителями.

Результаты настоящей работы могут быть рекомендованы для использования в следующих случаях:

- Непосредственное использование в составе сборки, в которой весь водный теплоноситель заменен на полиэтилен.
- Трубы с подобранным составом ячейки могут быть использованы в качестве драйвера, окружающего легководную центральную вставку в центре стенда БФС с твэлами из МОКС-топлива. В этом случае замена воды на полиэтилен осуществляется только во внешних слоях сборки стенда БФС, в которых располагаются штатные трубы стенда, в то время как в центральной части стенда располагается экспериментальное устройство из заполненного водой бака с твэлами.

Благодарности

Автор выражает глубокую благодарность: специалистам из НИЦ «Курчатовский институт» (Невиница В.А., Лапин А.С., Кузенкова Д.С., Внуков Р.А., Каширина В.Е., Котов Я.А., Фомиченко П.А., Колесов В.В., Бландинский В.Ю., Бобров Е.А., Осипов А.М.), специалистам из АО «ГНЦ РФ –

ФЭИ» (Коробейникова Л.В., Михайлов Г.М., Жуков А.М., Гулевич А.В., Стогов В.Ю., Фурманов В.М., Мантуров Г.Н., Елисеев В.А., Бедняков С.М., Изотов В.В., Прищепа В.В.), специалистам из АО «ТВЭЛ» (Радостин А.Ф., Пидопригора Е.В., Рыкунов Д.В.) за помощь, советы, консультации и идеи, которые отражены в настоящей работе. В частности, в формировании исходных данных, идей и предложений по формированию «универсальной» ячейки и ее спектральных условий, а также готовность к активному и плодотворному дискурсу.

Список литературы

1. Алексеев П.Н., Гагаринский А.Ю., Калугин М.А. К стратегии развития ядерной энергетики России // Атомная энергия. – 2019. – Т. 126. – № 4. – С. 183–187.
2. Semchenkov Y.M. et al. Formation of technical requirements to WWER-S // Proc. of the 9th International Scientific and Technical Conference Safety assurance of NPP with WWER. Scientific and technical electronic edition, 2015.
3. Kochetkov A., Doulin V., Semenov M., Rozhikhin Ye., Pavlova O. 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. NEA/NSC/DOC (2006)1.
4. Кочетков А.Л., Матвеев И.П., Рожихин Е.В., Цибуля А.М. Эксперименты в поддержку размещения МОКС-топлива в реакторы ВВЭР // Известия ВУЗов. Ядерная энергетика. – 2007. – № 3. – Вып. 1. – С. 99–108.
5. Внуков Р.А., Кузенкова Д.С. и др. Разработка программы экспериментов на стенде БФС-1 для экспериментального исследования нейтронно-физических особенностей реактора ВВЭР-С с МОКС-топливом // Нейтронно-физические проблемы атомной энергетики: Сб. тезисов докладов конференции, 28–31 мая 2024 года Обнинск, АО «ГНЦ РФ – ФЭИ», 2024. – С. 15–17.
6. Белов С.П., Дулин В.А., Кочетков А.Л., Матвеев И.П., Николаев М.Н., Семенов М.Ю., Цибуля А.М., Шапарь А.В. Результаты экспериментов на критических сборках БФС-57 и БФС-59 : Препринт ФЭИ-2681. – Обнинск, ФЭИ, 1998.
7. Кузенкова Д.С., Лапин А.С., Внуков Р.А. и др. Верификация расчетных подходов к планированию экспериментов по моделированию нейтронно-физических характеристик реактора ВВЭР-С на стенде БФС-1 // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Ядерно-реакторные константы. – 2024. – № 4. – С. 109–122.

8. Разработка АЗ РУ ВВЭР-С средней мощности для энергоблоков 1 и 2 Кольской АЭС // Официальный сайт Ядерного общества URL: <http://nsrus.ru/files/ppr/20230912/Osipov.pdf>.

9. MCNP – A General Monte Carlo Neutron-Particle Transport Code. Version 5. X-5 Monte Carlo Team, Los Alamos National Laboratory, April 2003.

10. IPPE, Institute for Physics and Power Engineering: ROSFOND – Режим доступа: <http://www.ippe.ru/podr/abbn/libr/intr-rosfond.php/>.

Подписано к печати 05.02.2025. Формат 60×84 ¹/₁₆. Усл. п. л. 0,7. Уч.-изд. л. 0,9.
Тираж 35 экз. Заказ № 23.

249033, Обнинск Калужской обл., пл. Бондаренко, 1.
АО «ГНЦ РФ – Физико-энергетический институт имени А.И. Лейпунского»