

ВЛИЯНИЕ РАЗМЕЩЕНИЯ ВЫГОРАЮЩЕГО ПОГЛОТИТЕЛЯ НА НЕЙТРОННО-ФИЗИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТЕПЛОВЫДЕЛЯЮЩЕЙ СБОРКИ ВВЭР-1200

Р.А. Внуков*, В.В. Колесов, И.А. Жаворонкова*, Я.А. Котов***,
М.Р. Праманик****

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

** *Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»
115409, г. Москва, Каширское шоссе, 31*

*** *НИЦ «Курчатовский Институт»
123182, г. Москва, пл. Академика Курчатова, д. 1*

Р

Оптимизация использования топлива в энергетическом реакторе является в настоящее время актуальной задачей. Но при этом поиску зависимостей между используемым обогащением, содержанием оксида гадолиния в твэгах и продолжительностью кампании в комплексе с оценкой эффективности использования твэгов с различным содержанием Gd_2O_3 уделяется мало внимания.

В работе рассматриваются варианты компоновки тепловыделяющих сборок для ВВЭР-1200, имеющих различное обогащение твэлов, твэгов и различное содержание оксида гадолиния в твэгах. Приводится сравнительный анализ сборок с гомогенным размещением Gd_2O_3 в каждом твэге и размещением с профилированием Gd_2O_3 . В последнем случае профилирование производится в зависимости от плотности потока нейтронов в гексагональном кольце, где размещаются твэги. Предполагается, что при расположении оксида гадолиния пропорционально плотности потока нейтронов нейтронно-физические характеристики ТВС улучшатся.

Результаты исследования получены с использованием многоцелевого трёхмерного программного комплекса SERPENT, реализующего метод Монте-Карло с непрерывным спектром энергии нейтронов. Сборки с параметрами для 12-месячного топливного цикла показали неэффективность данного метода в периоде свыше 300 эфф. сут. При увеличении обогащения и содержания оксида гадолиния использование профилированной версии оказывалось более рациональным для больших промежутков времени (вплоть до 900 эфф. сут). Таким образом, для реакторной кампании данное явление полагается релевантным, в то время как для топливной кампании оно оказывается несущественным. Отмечена сложная зависимость между содержанием гадолиния и урана в сборке и эффективным коэффициентом размножения для профилированной и исходной сборок. Эта зависимость нуждается в последующем детальном рассмотрении.

Ключевые слова: выгорающий поглотитель, оптимальное размещение, тепловыделяющая сборка, плотность потока нейтронов, метод Монте-Карло.

ВВЕДЕНИЕ

Выгорающие поглотители применяются в связи с необходимостью компенсации избыточной реактивности по соображениям безопасности при эксплуатации ядерной энергоустановки. Это можно трактовать как альтернативу использования борного регулирования (если говорить о реакторах водо-водяного типа), так и продлению топливной и реакторной кампании. Влияние на параметры кампании рассматривалось в работах [1 – 6]. Исследования ведутся и с позиции оценки поведения уран-гадолиниевого топлива при гомогенном смешивании элементов – при добавлении гадолиния к топливу изменяется его теплопроводность, что влияет на проектные характеристики. При концентрации $Gd_2O_3 \sim 10\%$ и плотности таблеток 10.62 г/см^3 поддерживается высокая теплопроводность [7]. Дальнейшие изменения данных значений приводили к уменьшению показателя параметра. Соотношение долевого отношения урана и гадолиния в топливе актуально с позиции его выгорания в реакторах.

Содержание Gd_2O_3 в штатных твэлах достигает 9 мас. % [8], а в экспериментальных – 12 мас.% [9]. Данное исследование представляет собой рассмотрение новых составов топлива с выгорающим поглотителем и включает в себя реакторные расчеты нейтронно-физических процессов с использованием метода Монте-Карло. Цель – определение возможности продления кампании при использовании выгорающих поглотителей. Топливо горит таким образом, что в процессе эксплуатации все большее количество делений U-235 происходит в более глубоких слоях твэла (твэга). Однако кассета из-за неравномерности выгорания предположительно извлекается до момента, когда высвобождается вся запасенная реактивность. Как итог, эффективность использования выгорающих поглотителей снижается.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Если рассматривать выгорание гадолиния в масштабах ТВС, то возникают закономерности, использование которых в профилировании ожидаемо даст положительный результат в вопросе о продлении кампании.

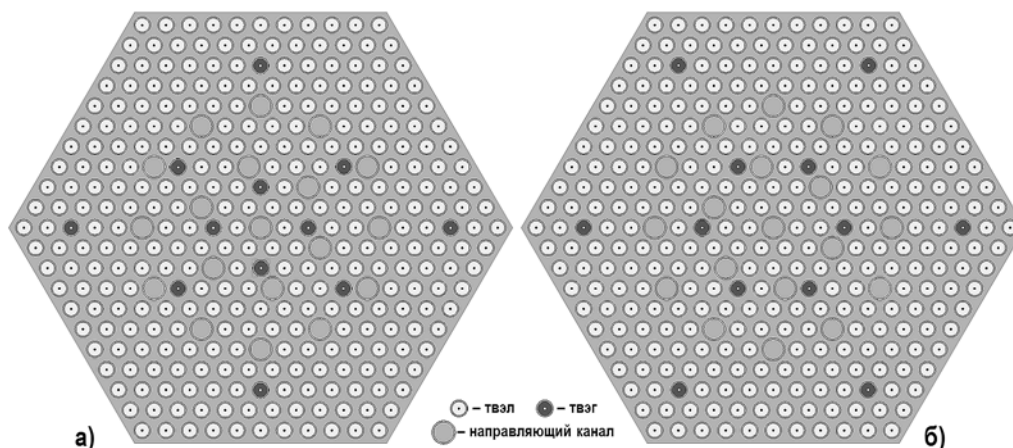


Рис.1. Модели размещения твэгов: а) – в третьем, шестом и девятом кольцах ТВС; б) – в третьем и восьмом кольцах (счет от периферии, вид сверху)

В работе исследуются различные варианты размещения гадолиния в ТВС. В

качестве исходной сборки принималась стандартная ТВС реактора ВВЭР-1200 с размещением 12-ти твэгов по углам шестигранника в третьем и восьмом кольцах (рис. 1).

В каждом твэге оксид гадолиния равномерно смешан с урановым топливом. Содержание Gd_2O_3 составляет 8%. Плотностная мощность принималась равной 36 кВт/кг топлива, что соответствует среднему показателю работы ВВЭР-1200. Предельное время кампании принималось равным 3360 эфф. сут. При этом наиболее интересными оказывались интервалы 0 – 360 и 0 – 560 эфф. сут.

Профилирование осуществлялось следующим образом: производилось оценивание плотности потока нейтронов на момент начальной загрузки в каждом гексагональном кольце, стартовые концентрации оксида гадолиния и диоксида урана устанавливались пропорционально плотности потока нейтронов, после чего выходные данные сравнивались со стандартной сборкой, когда концентрации не изменялись.

Таблица 1

Варианты моделируемых ТВС

Количество колец (номера)	Содержание оксида гадолиния, %	Обогащение твэгов, %	Обогащение твэгов, %
2 (3, 8)	8	4	4
2 (3, 8)	8	4.95	4
2 (3, 8)	8	4.95	4.95
2 (3, 8)	8	4.95	0.25
2 (4, 9)	8	4.95	4
3 (3, 6, 9)	8	4.95	4.95
2 (3, 8)	12	4	4
3 (3, 6, 9)	12	4	4
3 (3, 6, 9)	13.5	4.95	4.95
2 (3, 8)	13.5	4.95	5.2
3 (3, 6, 9)	13.5	4.95	5.2
2 (3, 8)	13.5	5.2	5.2
3 (3, 6, 9)	13.5	5.2	5.2
2 (3, 8)	13.5	5.45	5.45
3 (3, 6, 9)	13.5	5.45	5.45
2 (3, 8)	16	5.45	5.45
3 (3, 6, 9)	16	5.45	5.45
2 (3, 8)	20	5.45	5.45
3 (3, 6, 9)	20	5.45	5.45
2 (3, 8)	24	5.45	5.45
3 (3, 6, 9)	24	5.45	5.45

Использование выгорающего поглотителя позволяет сократить количество используемой борной кислоты в теплоносителе либо в целом увеличить запас реактивности при использовании той же концентрации борной кислоты и более высокого обогащения топлива. После получения данных выгорания исходной сборки ставилась задача поиска наиболее оптимального размещения. После получения данных с топливом заданного обогащения концентрация урана-235 изменя-

лась, причем как в твэлах, так и твэгах. Это делалось для подтверждения следующих тезисов:

1) увеличение обогащения топлива (в твэлах и твэгах) увеличивает время, когда более эффективным вариантом является профилирование гадолия по плотности потока нейтронов при рассмотрении микрокампаний более одного года (более 360 эфф. сут);

2) увеличение количества гексагональных колец, где размещаются твэги, при неизменности общего количества твэгов оптимально как для профилированной ТВС, так и для сборки с одинаковыми концентрациями;

3) увеличение концентрации гадолия в ТВС для профилирования (по отношению к равномерному распределению Gd_2O_3 в каждом твэге) даёт положительный эффект (большее значение k_{eff}) к концу микрокампании более длительное время.

Последний тезис нуждается в поиске максимальной концентрации оксида гадолия, при которой эффект профилирования на длительную кампанию будет положительный. Связано это с тем, что при росте количества гадолия в твэге общее количество урана падает. А так как с уменьшением концентрации урана-235 падает эффективность профилирования, то задача является оптимизационной.

В связи с этим рассматриваются сборки, представленные в табл. 1.

По количеству колец с учётом количества твэгов (12 штук) приемлемыми оказались две вариации: два и три кольца с твэгами (по четыре твэга в гексагональном кольце).

Обогащение твэлов и твэгов рассматривалось отдельно, поскольку оценивались два аспекта: эффективность профилированной сборки при повышенном обогащении твэлов, эффективность твэгов с дополнительным запасом реактивности.

Работа производилась в вычислительной среде программного комплекса SERPENT – многоцелевого трёхмерного программного комплекса, реализующего метод Монте-Карло с непрерывным спектром энергии нейтронов [10].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Определим формат буквенно-цифровой цепочки, облегчающий читателю восприятие характеристик сборок на графиках этого раздела:

КК_ВС_tvel_ОБ_{ТВЭЛ}_tveg_ОБ_{ТВЭГ}_СО[_НС][_ВТО][_ПТ].

Смысл элементов цепочки, выделенных жирным шрифтом, таков.

КК – количество колец, содержащих твэги, и нумерация этих колец. Например, «83» – твэги размещены в кольцах №3 и №8, считая от периферии ТВС; «369» – твэги в кольцах №3, №6 и №9.

ВС – версия сборки: «st» обозначает стандартную сборку, где содержание оксида гадолия в каждом твэге одинаковое, а «pr» – профилированную сборку, где концентрации в твэгах отличаются пропорционально плотности потока нейтронов.

ОБ_{ТВЭЛ} – процентное обогащение твэлов (например, 4.95% записывается в виде 4-95).

ОБ_{ТВЭГ} – процентное обогащение твэгов (например, 5.45% записывается в виде 5-45).

СО – процентное содержание оксида гадолия в твэге.

НС – нумерация сборки.

ВТО – временная точка отсчёта (0 эфф. сут, 360, 560, ...). Указывается при рассмотрении изменения плотности потока нейтронов (например, 560 эфф. сут записывается в виде 560d).

ПТ – положение твэга в ТВС (внутреннее гексагональное кольцо, среднее, внешнее). Указывается при рассмотрении изотопного состава гадолия-155.

Элементы, заключённые в квадратные скобки, являются необязательными.

Пример. Цепочка вида **38_st_tvel_4_tveg_4_8** означает размещение твэгов в

третьем и восьмом кольцах от периферии в стандартной сборке с обогащением твэлов 4%, твэгов – 4%, содержанием Gd_2O_3 – 8%.

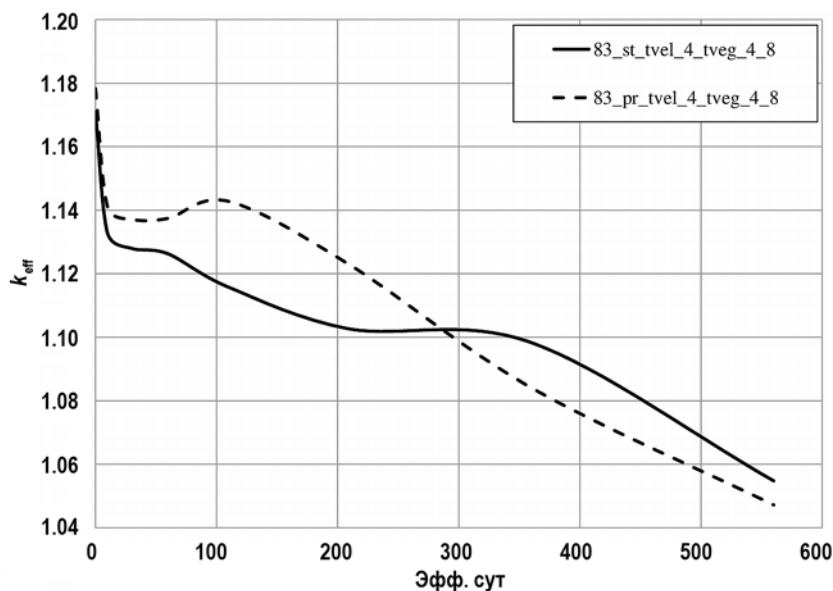


Рис. 2. Изменение k_{eff} для первой версии сборок

В работе оценивались k_{eff} , плотности потока нейтронов, расчет изотопного состава по методике, предложенной в [11]. Оценка изменения эффективного коэффициента размножения первой версии сборок представлена на рис. 2. Временной промежуток, при котором k_{eff} профилированной сборки больше k_{eff} стандартной для всех вариантов, представлен в табл. 2.

Очевидно, что при собственном спектре профилирование первой версии является неэффективным, поскольку в условиях микрокампаний более 300 суток более перспективным вариантом представляется стандартное размещение оксида гадолиния в ТВС. При этом данные по обогащению и содержанию Gd_2O_3 являются актуальными в сборках ВВЭР-1000 и ВВЭР-1200 в настоящее время. Дальнейшее рассмотрение вопроса производится с перспективными сборками, не используемыми в настоящее время [12 – 15].

Для второй версии следует отметить отсутствие значимого эффекта у профилированных сборок в момент времени, равный 360 эфф. сут. С другой стороны, в рамках рассмотрения микрокампаний с повышением обогащения в твэлах профилированная версия оказывается более эффективным вариантом в сравнении со стандартным размещением выгорающего поглотителя более длительный интервал времени.

Стоит отметить, что в случае с размещением твэгов в двух кольцах для третьей версии наблюдается та же ситуация, что и при обогащении твэгов в 4%. В случае же использования трех колец пересечение значения k_{eff} стандартной и профилированной версий сдвигается уже в правую сторону (в районе 390 эфф. сут), что является более перспективным вариантом в сравнении с предыдущими версиями сборок.

Состав твэга четвертой версии является бесперспективным, поскольку высвобождение реактивности практически отсутствует. Ввиду большого сечения радиационного захвата гадолиний быстро выгорает, что является отрицательной характеристикой при использовании данного поглотителя вместо, например, водного регулятора либо СУЗ. Небольшое плато наблюдается в первые два месяца работы, после чего сборка горит линейно. Нароботка плутония в профилированной и стандартной

сборках происходит аналогичным образом, что отражается на одинаковом поведении k_{eff} .

Таблица 2

Эффективность профилирования различных версий моделируемых ТВС

№ версии (содержание Gd ₂ O ₃ , %, обогачение твэлов, %, обогачение твэгов, %)	Количество гексагональных колец расположения твэгов (номера размещения)	Эфф. сутки в момент $k_{\text{eff}}(\text{profiled}) = k_{\text{eff}}(\text{standard})$
1 (8, 4, 4)	2 (3, 8)	291
2 (8, 4.95, 4)	2 (3, 8)	248
	2 (4, 9)	252
3 (8, 4.95, 4.95)	2 (3, 8)	359
	3 (3, 6, 9)	380
4 (8, 4.95, 0.25)	2 (3, 8)	171
	2 (4, 9)	360
5 (13.5, 4.95, 4.95)	3 (3, 6, 9)	563
6 (13.5, 4.95, 5.2)	2 (3, 8)	541
	3 (3, 6, 9)	572
7 (13.5, 5.2, 5.2)	2 (3, 8)	548
	3 (3, 6, 9)	583
8 (13.5, 5.45, 5.45)	2 (3, 8)	615
	3 (3, 6, 9)	673
9 (16, 5.45, 5.45)	2 (3, 8)	652
	3 (3, 6, 9)	682
10 (20, 5.45, 5.45)	2 (3, 8)	759
	3 (3, 6, 9)	823
11 (24, 5.45, 5.45)	2 (3, 8)	892
	3 (3, 6, 9)	1055
12 (12, 4, 4)	2 (3, 8)	436
	3 (3, 6, 9)	462

В пятом варианте представлены только версии с тремя кольцами, поскольку версия является промежуточной, а большее количество колец показало себя более перспективным исполнением сборок. Кроме того, можно подчеркнуть более долгое горение гадолиния. Пересечение значений k_{eff} для разных сборок уходит за 560 эфф. сут, что говорит о перспективности данного варианта профилирования сборки при прочих равных условиях в случае 12- и 18-месячного топливного циклов.

Увеличение обогачения до 5.2%, а также 13.5% содержание оксида гадолиния представляет сборку с двумя кольцами самой перспективной при микрокампании менее 500 эфф. сут. В интервале между 500 и 560 эфф. сут версия с профилированием трех колец твэгов является наиболее оптимальной из рассматриваемых. При цикле более 560 сут стандартное размещение оксида гадолиния является более эффективным.

Незначительное (относительно повышения обогачения при рассмотрении первой и второй версий) увеличение количества урана-235 в ТВС в седьмой версии за

счет повышения обогащения в твэлах далее не сказывается на поведении k_{eff} во время кампании с заданным количеством гадолиния и форматом размещения. Стоит подчеркнуть, что в шестой и седьмой версиях долгое время наблюдалось явное преимущество сборки с двумя кольцами, однако более равномерно горячей является версия с профилированием размещения оксида гадолиния по трем кольцам.

Дальнейшее увеличение обогащения в топливе (восьмая версия) приводит к возможности увеличения продолжительности отдельно взятого цикла с позиции оценки эффективности использования профилированной версии ТВС. Причем профилированное размещение выгорающего поглотителя в двух кольцах является более эффективным на протяжении 550 эфф. сут в сравнении с размещением в трёх кольцах и на протяжении 610 эфф. сут в сравнении со стандартным размещением. Профилированное размещение твэгов в три гексагональных кольца ТВС эффективно вплоть до 660 эфф. сут.

Увеличение содержания оксида гадолиния в ТВС (версии 9 – 11) приводит к смещению точки пересечения линий k_{eff} профилированной и стандартной сборки вне зависимости от размещения. Рассматривая нейтронно-физическую сторону вопроса, находим, что при пропорциональном увеличении обогащения топлива и содержания гадолиния в твэгах топливный цикл для профилированной версии может быть эффективным более 860 эфф. сут (5.45% обогащение, содержание Gd_2O_3 24%).

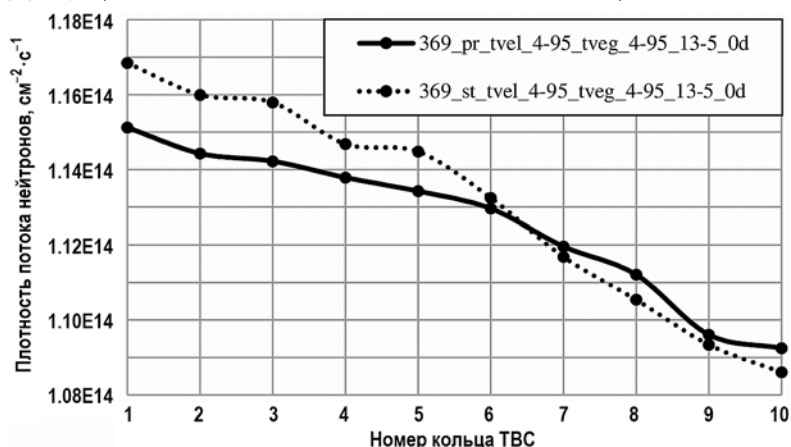


Рис. 3. Эффект профилирования на плотность потока нейтронов в $t = 0$ эфф. сут

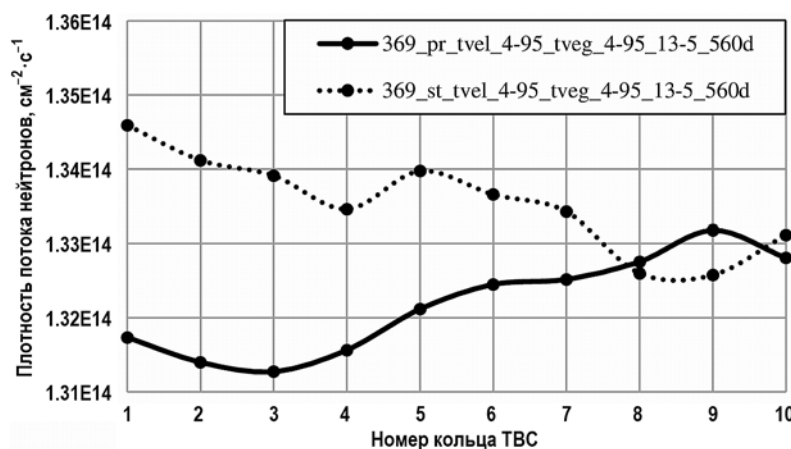


Рис. 4. Эффект профилирования на плотность потока нейтронов в $t = 560$ эфф. сут

Вторым интересным аспектом является изменение распределения плотности потока нейтронов по радиусу ТВС. Для этого в каждом кольце определялось среднее значение суммарной плотности потока нейтронов. Расчетные результаты предлагаются для пятой версии в начальный момент времени (рис. 3) и в момент $t = 560$ эфф. сут (рис. 4). Реперные точки выбраны согласно поведению k_{eff} (точки близки к моменту пересечения линий k_{eff} стандартной и профилированной сборок).

Для всех рассмотренных версий градиент плотности потока нейтронов для начального момента времени стал меньше у профилированной версии сборок. Однако к моменту, когда эффективность профилирования ТВС падает, градиент исходной сборки становится меньше либо аналогичен профилированному. Это, вероятно, объясняется неравномерным выгоранием твэгов в разных кольцах. Визуально это можно наблюдать на рис. 5, 6.

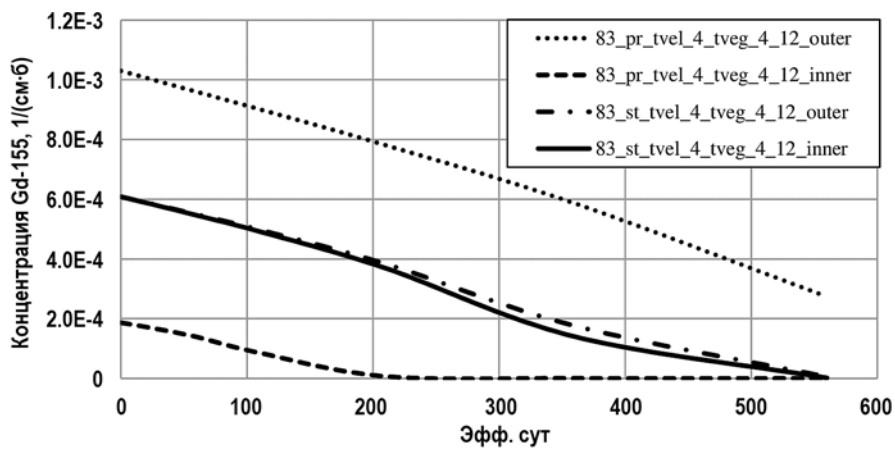


Рис. 5. Изменение изотопного состава Gd-155 для размещения твэгов в двух кольцах (обогащение 4% содержание Gd_2O_3 в твэгах 12%)

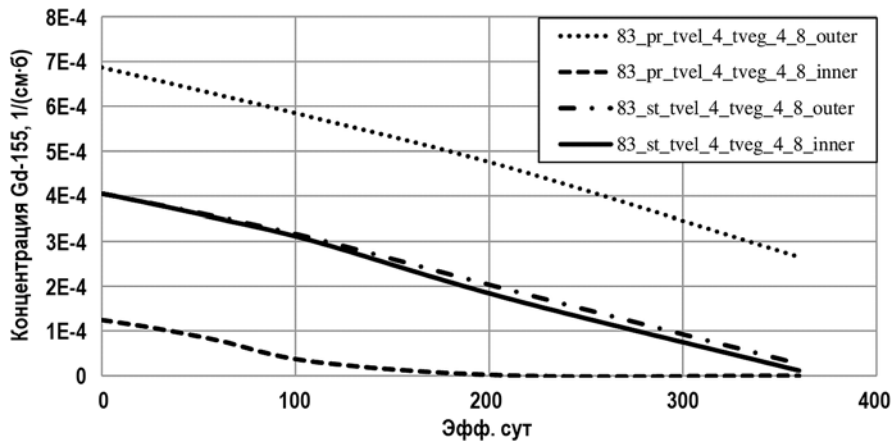


Рис. 6. Изменение изотопного состава Gd-155 для размещения твэгов в двух кольцах (обогащение 4% содержание Gd_2O_3 в твэгах 8%)

Показательным является результат, когда концентрация Gd-155 стремится к нулю уже на 200-х эфф. сут, в то время как для внешнего кольца концентрация обоих изотопов к моменту в 360 эфф. сут ещё остаётся значительной. Таким образом, изотопный дисбаланс приводит к неравномерной плотности потока нейтронов в момент времени, когда стандартная сборка является более эффективной, нежели профилированная.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты работы говорят о преимуществе использования профилирования для сборок с тремя кольцами твэгов. При этом в случае равномерного распределения гадолиния в твэгах сборки с размещением в три кольца и в два кольца имеют идентичные показатели k_{eff} в разные моменты времени.

Увеличение количества гадолиния на текущий момент благоприятно сказывается на выравнивании k_{eff} в процессе выгорания топлива. С ростом обогащения топлива эффект от профилирования выгорающего поглотителя по ТВС повышается.

Увеличение количества гадолиния уменьшает общее количество урана, поэтому при одном и том же обогащении может наступить момент, когда дальнейшее увеличение содержания Gd_2O_3 приведёт к ухудшению эффективности профилирования. Согласно результатам расчетов, такой момент настанет, когда содержание гадолиния будет столь высоким, что превысит технологический порог работоспособности уран-гадолиниевое топлива.

Благодарности

Работа выполнена при поддержке Программы повышения конкурентоспособности НИЯУ МИФИ.

Литература

1. *Abu Sondos M.A., Demin V.M. and Savander V.I.* The Effect of Burnable Absorber (Gd and Eu) on the Neutron-Physics Characteristic of Fuel Assemblies of VVER-1000 Reactor. // IOP Conference Series: Journal of Physics: Conference Series. – 2019. DOI: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1189/1/012003>.
2. *Абу Сондос М.А., Демин В.М., Савандер В.И.* Снижение объема борного регулирования запаса реактивности при использовании выгорающего поглотителя на основе Gd_2O_3 в топливе реактора ВВЭР-1200. // Глобальная ядерная безопасность. – 2019. – № 3 (32). – С. 56-65; DOI: <https://doi.org/10.26583/gns-2019-03-06>.
3. *Абу Сондос М.А., Демин В.М., Смирнов А.Д.* Сравнительный анализ нейтронных характеристик ядерного топлива производства Westinghouse и твэлов для реакторов типа ВВЭР-1000 по коду SERPENT. // Глобальная ядерная безопасность. – 2019. – № 2 (31). – С. 103-109; DOI: <https://doi.org/10.26583/GNS-2019-02-12>.
4. *Frybortova L.* Recommended Strategy and Limitations of Burnable Absorbers used in VVER Fuel Assemblies. // Nuclear Science and Technology. – 2019. – Vol. 30. – No. 8. – P. 14. DOI: <https://doi.org/10.1007/s41365-019-0651-x>.
5. *Khoshahval F., Foroutan S. S., Zolfaghari A., Minucmehr H.* Evaluation of Burnable Absorber Rods Effect on Neutronic Performance in Fuel Assembly of VVER-1000 Reactor. // Annals of Nuclear Engineering. – 2016. – Vol. 87. – PP. 648-658. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.anucene.2015.10.012>.
6. *Saad H.M., Refeat R., Aziz M., Mansour H.* Effect of Axial Distribution of Gadolinium Burnable Poison in Advanced Pressurized Water Reactor Assembly. // Nuclear and Radiation Safety Journal. – 2019. – Vol. 84. – No. 4. – PP. 46-53. DOI: [https://doi.org/10.32918/nrs.2019.4\(84\).06](https://doi.org/10.32918/nrs.2019.4(84).06).
7. *Iwasaki K., Matsui T., Yanai K., Yuda R., Arita Y., Nagasaki T., Yokoyama N., Tokura I., Une K., Harada K.* Effect of Gd_2O_3 Dispersion on the Thermal Conductivity of UO_2 . // Nuclear Science and Technology. – 2009. – Vol. 46. – No. 7. – PP. 673-676.
8. *Сливин А.А., Аникин М.Н., Чертков Ю.Б.* Возможность использования альтернативных выгорающих поглотителей в ядерных реакторах типа ВВЭР. // Сб. докл. конф. «Актуальные проблемы инновационного развития ядерных технологий», 21-25 марта 2016 г. – Северск: ФГАОУ ВПО «НИЯУ МИФИ», Северский технологический институт, 2016. – С. 51.
9. *Крюков Ф.Н., Лядов Г.Д., Никитин О.Н.* Исследование состояния топлива реакторов на тепловых нейтронах методом электронно-зондового микроанализа. // ВАНТ. Се-

рия: Физика ядерных реакторов. – 2005. – Вып. 5. – С. 94-103.

10. SERPENT – MCRPVSS. Электронный ресурс: <http://montecarlo.vtt.fi> (дата доступа 06.11.2020).

11. *Leppaanen J., Pusa M., Viitanen T., Valtavirta V., Kaltiaisenaho T.* The SERPENT Monte Carlo Code: Status, Development and Applications in 2013. // Ann. Nucl. Energy. Elsevier Ltd. – 2015. – Vol. 82. – PP. 142-150.

DOI: <https://doi.org/10.1016/j.anucene.2014.08.024>.

12. *Stefanova S., Chantoin P. and Kolev I.G.* VVER Reactor Fuel Performance. Modelling and Experimental Support. // Proceedings of the International Seminar held in St. Constantine, Varna, Bulgaria on 7-11 Nov. 1994. – Varna, Bulgaria, 1994. – 260 p. Электронный ресурс: https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/_Public/28/031/28031101.pdf (дата доступа 06.11.2020).

13. Operation and Licensing of Mixed Cores in Water Cooled Reactors. – Vienna: IAEA, 2013. – 90 p. (IAEA-TECDOC series, ISSN 1011-4289; no. 1720). Электронный ресурс: https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/TE-1720_web.pdf (дата доступа 06.11.2020).

14. Advanced Fuel Pellet Materials and Fuel Rod Design for Water Cooled Reactors. // Proceedings of the Technical Committee Meeting on 23-26 Nov. 2009. – Villigen: IAEA, 2009. – 241 p. Электронный ресурс: https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/te_1654_web.pdf (дата доступа 06.11.2020).

15. Status Report for Advanced Nuclear Reactor Designs – Report 108 «VVER-1200 (V491) (VVER-1200 (V-491))», International Atomic Energy Agency. – Vienna, Austria: IAEA, 2011. – 32 p. Электронный ресурс: [http://www.iaea.org/NuclearPower/Downloadable/aris/2013/36.VVER-1200\(V-491\).pdf](http://www.iaea.org/NuclearPower/Downloadable/aris/2013/36.VVER-1200(V-491).pdf) (дата доступа 06.11.2020).

Поступила в редакцию 11.11.2020 г.

Авторы

Внуков Руслан Адхамович, студент

E-mail: levz555@mail.ru

Колесов Валерий Васильевич, доцент, канд. физ.-мат. наук

E-mail: valeri-kolesov@yandex.ru

Жаворонкова Ирина Андреевна, студент

E-mail: Zhavoronkovaia@oiate.ru

Котов Ярослав Александрович, научный сотрудник

E-mail: kotov_ya@nrcki.ru

Праманик Мд Масум Рана, студент

E-mail: masum1203014@gmail.com

UDC 621.039.51

EFFECT OF THE BURNABLE ABSORBER ARRANGEMENT ON THE VVER-1200 FUEL ASSEMBLY NEUTRONIC PERFORMANCEVnukov R.A., Kolesov V.V., Zhavoronkova I.A., Kotov Y.A., Pramanik M.R.

* Obninsk Institute for Nuclear Power Engineering, NRNU «MEPhI»

1 Studgorodok, 249040 Obninsk, Kaluga Reg., Russia

** National Research Nuclear University «MEPhI»

31, Kashirskoe Hwy, 115409 Moscow, Russia

NRC «Kurchatov Institute»

1 Akademichian Kurchatov Sq., 123182 Moscow, Russia

ABSTRACT

Optimizing the use of fuel in a power reactor is a task of current concern. However, little attention has been given to investigating the dependences among the enrichment used, the content of gadolinium oxide in fuel rods, and the life time in combination with evaluating the efficiency of using Gd loaded fuel elements with different Gd_2O_3 contents.

The paper considers fuel assembly versions for VVER-1200 reactors having different enrichments for fuel elements, including those with Gd, and different contents of gadolinium oxide in fuel. A comparative analysis is presented for assemblies with homogeneous Gd_2O_3 arrangements in each fuel element and with profiled Gd_2O_3 arrangements. In the latter case, profiling depends on the neutron flux density in the layer which includes fuel elements with Gd. This suggests that the arrangement of gadolinium oxide proportionally to the neutron flux density will improve the FA neutronic performance.

The results were obtained using SERPENT (a continuous-energy multi-purpose three-dimensional Monte Carlo particle transport code). The assemblies with the used parameters for a 12-month fuel cycle have shown the method under consideration to be inefficient for a period of over 300 eff. days. With an increased enrichment of the gadolinium oxide contained, the use of profiled versions has turned out to be more rational for longer periods (up to 900 eff. days). Therefore, this phenomenon is relevant for the reactor life whereas it proves to be insignificant for the fuel life. It is emphasized that the complex relationship between the content of gadolinium and uranium in the assembly and the effective multiplication factor for the profiled assembly and the initial assembly should be considered in detail.

Key words: burnable absorber, optimal profiling, fuel assembly, neutron flux density, Monte Carlo method.

REFERENCES

1. Abu Sondos M.A., Demin V.M. and Savander V.I. The Effect of Burnable Absorber (Gd and Eu) on the Neutron-Physics Characteristic of Fuel Assemblies of VVER-1000 Reactor. *IOP Conference Series: Journal of Physics: Conference Series*. – 2019. DOI: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1189/1/012003>.
2. Abu Sondos M.A., Demin V.M., Savander V.I. Reduction of Boron Reactivity Reserve Control when using a Gd_2O_3 -based Burnup Absorber in the VVER-1200 Reactor Fuel. *Global'naya Yadernaya Bezopasnost'*. 2019, no. 3 (32), pp. 56-65; DOI: <https://doi.org/10.26583/gns-2019-03-06> (in Russian).
3. Abu Sondos M.A., Demin V.M., Smirnov A.D. Comparative Analysis of Neutronic Characteristics of Nuclear Fuel Produced by Westinghouse and Fuel Rods for VVER-1000-type Reactors by SERPENT Code. *Global'naya Yadernaya Bezopasnost'*. 2019, no. 2 (31), pp. 103-109; DOI: <https://doi.org/10.26583/GNS-2019-02-12> (in Russian).
4. Frybortova L. Recommended Strategy and Limitations of Burnable Absorbers used in VVER Fuel Assemblies. *Nuclear Science and Technology*. 2019 v. 30, no. 8, p. 14; DOI:

<https://doi.org/10.1007/s41365-019-0651-x>.

5. Khoshahval F., Foroutan S. S., Zolfaghari A., Minucmehr H. Evaluation of Burnable Absorber Rods Effect on Neutronic Performance in Fuel Assembly of VVER-1000 Reactor. *Annals of Nuclear Engineering*. 2016, v. 87, pp. 648-658; DOI: <https://doi.org/10.1016/j.anucene.2015.10.012>.

6. Saad H.M., Refeat R., Aziz M., Mansour H. Effect of Axial Distribution of Gadolinium Burnable Poison in Advanced Pressurized Water Reactor Assembly. *Nuclear and Radiation Safety Journal*. 2019, v. 84, no. 4, pp. 46-53; DOI: [https://doi.org/10.32918/nrs.2019.4\(84\).06](https://doi.org/10.32918/nrs.2019.4(84).06).

7. Iwasaki K., Matsui T., Yanai K., Yuda R., Arita Y., Nagasaki T., Yokoyama N., Tokura I., Une K., Harada K. Effect of Gd_2O_3 Dispersion on the Thermal Conductivity of UO_2 . *Nuclear Science and Technology*. 2009, v. 46, no. 7, pp. 673-676.

8. Slivin A.A., Anikin M.N., Chertkov Yu.B. Possibility of Alternative Burnup Absorbers in VVER-type Nuclear Reactors. *Proc. of the Conf. «Actual Problems of Innovative Development of Nuclear Technologies»*, March 21-25, 2016. Seversk. Federal State Educational Institution of Higher Professional Education «NIYaU MIFI». Seversk Institute of Technology Publ., 2016, p. 51 (in Russian).

9. Kryukov F.N., Lyadov G.D., Nikitin O.N. Investigation of the Fuel State of Thermal Neutron Reactors by Electron-Probe Microanalysis. *VANT. Ser: Fizika Yadernykh Reaktorov*. 2005, iss. 5, pp. 94-103 (in Russian).

10. SERPENT – MCRPBCC. Available at: <http://montecarlo.vtt.fi> (accessed Nov. 06, 2020).

11. Leppaanen J., Pusa M., Viitanen T., Valtavirta V., Kaltiaisenaho T. The SERPENT Monte Carlo Code: Status, Development and Applications in 2013. *Ann. Nucl. Energy*. Elsevier Ltd. 2015, v. 82, pp. 142-150. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.anucene.2014.08.024>.

12. Stefanova S., Chantoin P. and Kolev I.G. VVER Reactor Fuel Performance. Modelling and Experimental Support. *Proc. of the International Seminar held in St. Constantine, Varna, Bulgaria on 7-11 Nov. 1994*. Varna, Bulgaria, 1994, 260 p. Available at:

https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/_Public/28/031/28031101.pdf (accessed Nov. 06, 2020).

13. *Operation and Licensing of Mixed Cores in Water Cooled Reactors*. Vienna. IAEA, 2013, 90 p. (IAEA-TECDOC series, ISSN 1011-4289; no. 1720). Available at: https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/TE-1720_web.pdf (accessed Nov. 06, 2020).

14. Advanced Fuel Pellet Materials and Fuel Rod Design for Water Cooled Reactors. *Proc. of the Technical Committee Meeting on 23-26 Nov. 2009*. Villigen. IAEA, 2009, 241 p. Available at: https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/te_1654_web.pdf (accessed Nov. 06, 2020).

15. Status Report for Advanced Nuclear Reactor Designs – Report 108 «VVER-1200 (V491) (VVER-1200 (V-491))». International Atomic Energy Agency. Vienna, Austria. IAEA, 2011, 32 p. Available at: [http://www.iaea.org/NuclearPower/Downloadable/aris/2013/36.VVER-1200\(V-491\).pdf](http://www.iaea.org/NuclearPower/Downloadable/aris/2013/36.VVER-1200(V-491).pdf) (accessed Nov. 06, 2020).

Authors

Vnukov Ruslan Adhamovich, Student

E-mail: levz555@mail.ru

Kolesov Valery Vasilievich, Assistant Professor, Cand. Sci. (Phys.-Math.)

E-mail: valeri-kolesov@yandex.ru

Zhavoronkova Irina Andreevna, Student

E-mail: Zhavoronkovaia@oiate.ru

Kotov Yaroslav Aleksandrovich, Researcher

E-mail: kotov_ya@nrcki.ru

Pramanik Md Masum Rana, Student

E-mail: masum1203014@gmail.com