

УДК: 621.039.5

DOI: <https://doi.org/10.26583/npe.2026.3.13>

Оригинальная статья / Original paper

Исследование влияния использования радиального отражателя на нейтронно-физические характеристики модульного реактора малой мощности

А.А. Воронцова, Р.А. Внуков, В.В. Колесов

ИАТЭ НИЯУ МИФИ,

249039 Россия, Калужская обл., г. Обнинск, Студгородок, д. 1

Реферат. Работа посвящена исследованию влияния графитового отражателя, размещенного за корпусом реактора, на нейтронно-физические характеристики малого модульного реактора на тестовом примере модели реактора. Предлагается рассмотреть влияние толщины отражателя на спектр нейтронов, энерговыделение и длительность топливной кампании. Предложены модели с поэтапным увеличением графитового слоя в течение кампании от 0 до 20 см с шагом 2, 5 и 10 см. При таком подходе на начало кампании отражатель отсутствует, а изменение толщины отражателя происходит при достижении $K_{эфф}$ значения меньше 1,000. При моделировании такой кампании было замечено, что каждый из рассмотренных шагов позволяет получить выигрыши в длине кампании топлива, которые оказываются почти идентичными. Применение отражателя оказывает сильное влияние на периферийные ТВС – размещение отражателя приводит к выравниванию энерговыделения в пределах ТВС, а также способствует смещению спектра нейтронов в тепловую область, центр же активной зоны практически не претерпевает изменений. При рассмотрении состава выгружаемого топлива на конец кампании для моделей с отражателем наблюдается уменьшение количества плутония в сравнении с исходной моделью, однако его чистота улучшается. При этом размер отражателя не оказывает влияние на качество плутония. В целом использование графитового отражателя положительно влияет на нейтронно-физические характеристики реактора, включая увеличение длины кампании и выравнивание поля энерговыделения. В дальнейшем планируется исследовать другие материалы отражателей, такие как бериллий и гидрид циркония.

Ключевые слова: отражатель нейтронов, графит, энерговыделение, спектр нейтронов, изотопный состав.

Для цитирования: Воронцова А.А., Внуков Р.А., Колесов В.В. Исследование влияния использования радиального отражателя на нейтронно-физические характеристики модульного реактора малой мощности. *Известия вузов. Ядерная энергетика*. 2026;3:182–195. DOI: <https://doi.org/10.26583/npe.2026.3.13>

Введение

В настоящее время имеется лишь малое количество работ, исследующих влияние отражающих материалов на нейтронно-физические характеристики малых реакторов [1 – 4]. Предлагаемая работа может позволить в какой-то степени заполнить этот пробел для класса малых модульных реакторов.

Описание модели модульного реактора малой мощности

Для изучения влияния радиального отражателя на нейтронно-физические характеристики малых модульных реакторов была создана модель активной зоны реактора малой мощности на основе открытых источников [5 – 7], представленная на рис. 1.

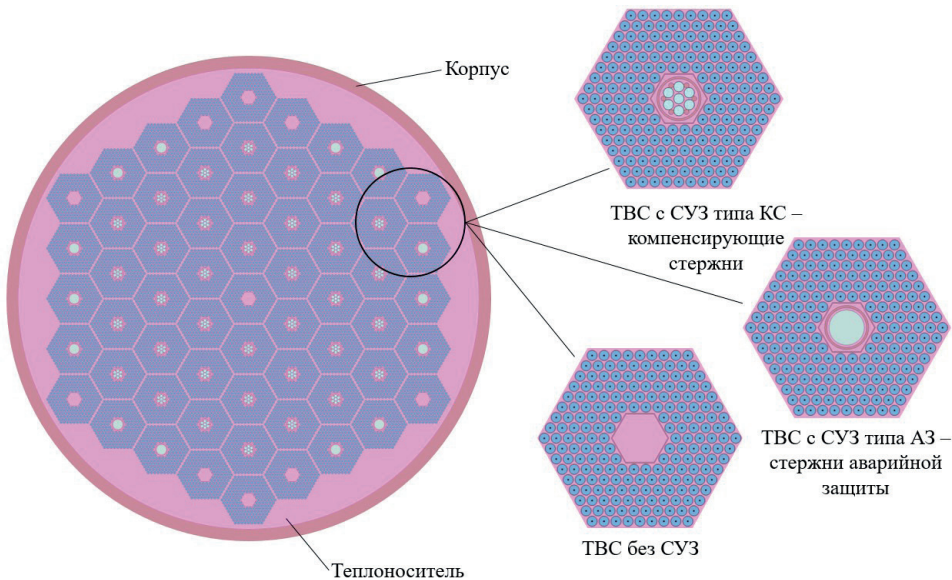


Рис. 1. Расчетная модель активной зоны модульного реактора малой мощности с описанием ТВС

Активная зона представляет собой сборку из 61 бесчехловых ТВС. Эквивалентный диаметр активной зоны составляет 164,3 см, его высота – 90 см. Вместо 19-ти центральных твэлов располагается шестиугольная труба для органов регулирования системы управления и защиты (ОР СУЗ), в качестве которых используются стержни из карбида бора разных размера и компоновки. Как видно из рис. 1, ТВС делятся на три типа: с ОР СУЗ типа КС (компенсирующие стержни), ОР СУЗ типа АЗ (стержни аварийной защиты) и ТВС без ОР СУЗ.

Топливный столб в каждом твэле снизу и сверху окружен торцевым отражателем из обедненного урана, который образует торцевую зону воспроизводства общей толщиной 50 см. Высота твэла – 206 см. В качестве топлива используется диоксид урана с обогащением 16,1% по ^{235}U . Теплоносителем является смесь свинца и висмута (55,5% Bi).

Подбор размера отражателя

Для реализации задач исследования в модели реактора за корпусом (без зазора) устанавливается боковой отражатель из графита. Аксиально отражатель ограничивается размерами твэла (206 см).

Расчетные исследования проводились в программном комплексе Serpent, реализующем метод Монте-Карло, с использованием библиотеки оцененных ядерных данных JEFF-3.1.1 [8, 9].

За исходное положение ОР СУЗ принято такое, при котором $K_{эфф}$ на начало кампании составляет 1,03. При таком условии АЗ и часть КС необходимо убрать, оставив два центральных ряда ТВС с КС. Тогда всего в активной зоне останется 16 погруженных ОР СУЗ.

При оценке влияния размера отражателя на запас реактивности в начале кампании рассматривались модели с полностью выведенными и погруженными ОР СУЗ. Графическая зависимость отображена на рис. 2.

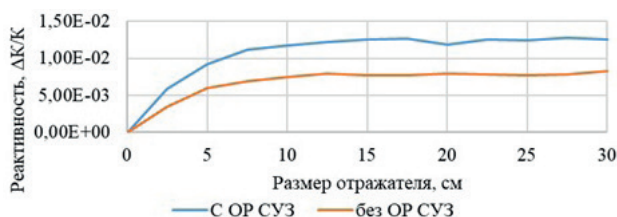


Рис. 2. Зависимость запаса реактивности от размера отражателя

Для обеих моделей очевиден выход на асимптотику при толщине графитового слоя свыше 10 см, что говорит о неэффективности использования отражателя толщиной 12 см и более на начало кампании. Для модели с ОР СУЗ эффективность отражателя выражена сильнее из-за депрессии нейтронов поглотителями, располагаемыми в центральных ТВС.

Для отслеживания зависимости $K_{эфф}$ картограмма аналогична исходной (в активной зоне находятся два ряда ОР СУЗ). Сравнивались модели с толщиной отражателя 0 и 10 см. Толщина отражателя не менялась на протяжении всей топливной кампании. Длительность исходной кампании принята 3600 эффективных суток [10].

Для обеих моделей темп потери реактивности ведет себя одинаково за время всей топливной кампании. Зависимость линейная, поэтому создающийся в начале кампании запас реактивности в 1% у модели с отражателем не меняется со временем

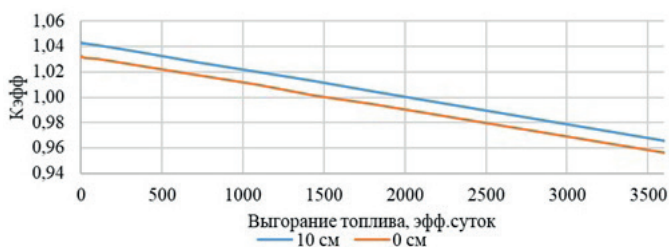


Рис. 3. Зависимость $K_{эфф}$ от эфф. суток при выгорании топлива

и к концу кампании таким же сохраняется, что в данном случае позволяет говорить об эффективности такой модели при выгорании топлива в сравнении с исходной моделью.

Далее рассматривалось моделирование кампаний с изменением толщины отражателя в процессе выгорания топлива в диапазоне от 0 до 20 см. В таком случае на начальном этапе отражатель полностью отсутствовал, далее происходило увеличение графитового слоя до момента времени, когда $K_{эфф}$ падал ниже 1,000. На рисунке 4 приведены зависимости для $K_{эфф}$ в течение кампании для изменения толщины отражателей с шагами 2, 5 и 10 см. Длительность топливной кампании, как и ранее, взята 3600 эфф. сут.

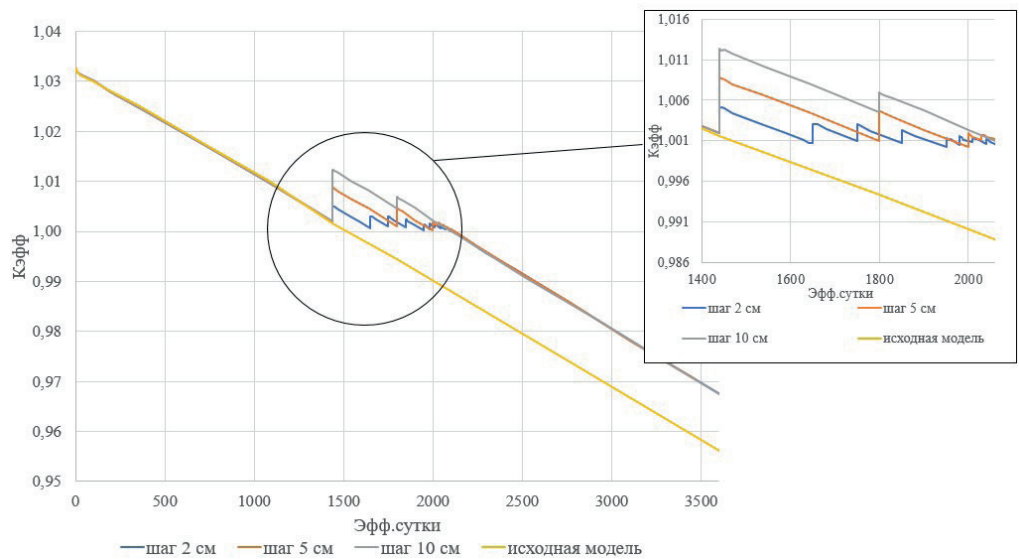


Рис. 4. Зависимости $K_{эфф}$ в течение выгорания топлива для разных шагов изменения толщины отражателя

При таком подходе все рассмотренные модели имеют преимущество в длительности топливной кампании по сравнению с исходной моделью без отражателя. После примерно 2000 эфф. суток любой из представленных шагов изменения графитового слоя имеет схожий темп потери реактивности и практически равный $K_{эфф}$ на конец кампании (табл. 1).

Таблица 1

**$K_{эфф}$ на конец кампании (3600 эфф. суток)
для моделей с разным шагом изменения толщины отражателя**

Шаг отражателя, см	$K_{эфф}$
0	$0,9562 \pm 0,0001$
2	$0,9689 \pm 0,0001$
5	$0,9704 \pm 0,0001$
10	$0,9675 \pm 0,0001$

Как видно из рисунка, если отражатель будет иметь максимальную толщину в 10 см, то наиболее эффективным отражателем является вариант с поэтапным добавлением с шагом в 2 см (чем меньше шаг, тем ниже ввод положительной реактивности). Исходя

из данных табл. 1 наибольший $K_{эфф}$ на 3600 эфф. суток при использовании шага в 5 см, однако отклонение от других вариантов добавления отражателя много ниже, чем от исходной модели (0,25% $\Delta K/K$ между вариантами 5 и 10 см и 1,42% между вариантом с шагом в 5 см и исходным). Дальнейшее увеличение толщины отражателя с 10 до 20 см дает небольшое увеличение длины кампании (около 100 эфф. суток), при этом разные варианты шагов практически не имеют разницы с точки зрения продления кампании. Это говорит о том, что при достаточно большой толщине отражателя (в диапазоне 10 см и выше) нет существенной разницы при использовании различных шагов добавления отражателя, так как они дают идентичные приросты в длине кампании, однако малый шаг более выгоден, поскольку вводимая положительная реактивность имеет небольшие значения, что лучше с точки зрения управления реактором. Если рассматривать длительность кампании на период, где $K_{эфф} \geq 1$, при использовании толщины отражателя 20 см вне зависимости от шага добавления совокупное увеличение составляет 620 эфф. суток.

Влияние отражателя на нейтронно-физические характеристики реактора

Для наглядной оценки воздействия отражателя на нейтронный спектр сравниваются две модели: с отражателем толщиной 10 см и без него (исходная модель). Отслеживание потоков происходит в трех областях: центральная ТВС, серединные ТВС (ТВС с ОР СУЗ) и периферийные ТВС, находящиеся около корпуса реактора. График распределения плотности потока нейтронов представлен на рис. 5.

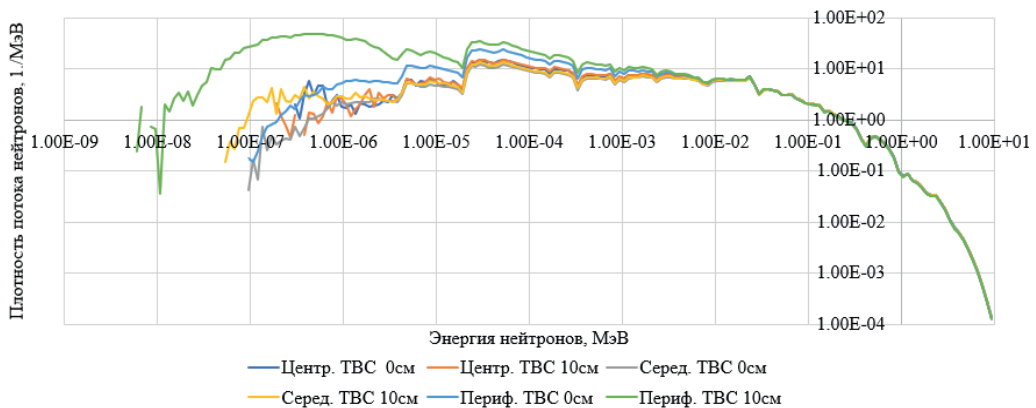


Рис. 5. Распределение плотности потока нейтронов по энергиям

Основные изменения, которые вносит отражатель в спектр нейтронов, заметны у периферийных ТВС. Для модели с отражателем – спектр смещается в более тепловую область. Этот же эффект наблюдается и для модели без отражателя, однако он менее выражен и связан с взаимодействием нейтронов с ядрами стального корпуса, которые рассеивают нейтроны менее интенсивно в сравнении с графитом. В быстрой области поток нейтронов для обеих моделей не изменен. В целом спектр нейтронов в реакторе остается быстрым. В качестве количественной оценки удобно

рассмотреть $\alpha(^{239}\text{Pu})$. Для периферийной и центральной зон исходной модели она равна $0,204 \pm 0,001$ и $0,199 \pm 0,001$, тогда как для варианта с отражателем толщиной 10 см равна $0,215 \pm 0,001$ и $0,199 \pm 0,001$. Для сравнения $\alpha(^{239}\text{Pu})$ для реакторов типа БН $\sim 0,2$, ВВЭР $\sim 0,6$.

При сравнении распределения энерговыделения для обеих моделей можно заметить некоторое его выравнивание у модели с отражателем (рис. 6б): радиальные коэффициенты неравномерности у ТВС, находящихся на границе активной зоны, у исходной и измененной моделей различаются на 17%, при этом в центральных ТВС разница в неравномерности снижается примерно до 9%. Для удобства на рис. 6 показана 1/6 часть активной зоны.

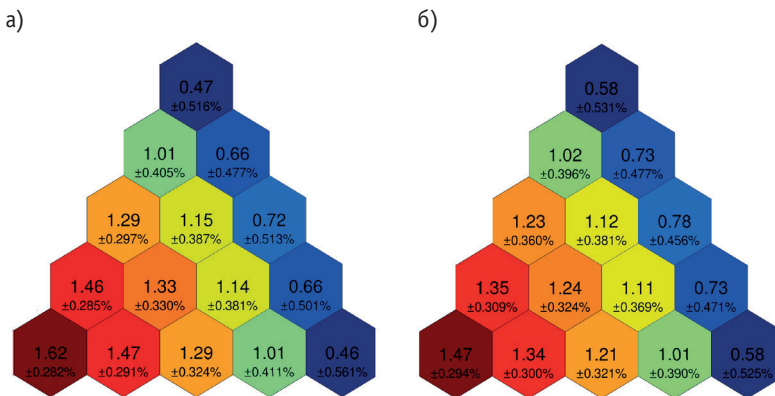


Рис. 6. Распределение коэффициентов неравномерности энерговыделения по ТВС: а) модель без отражателя, б) модель с отражателем 10 см

Увеличение энерговыделения на периферийных ТВС связано с ростом потока тепловых нейтронов ввиду наличия графитового отражателя, тогда как в центральной части активной зоны наблюдается снижение, вызванное перераспределением суммарного нейтронного потока – его возрастание у края приводит к уменьшению в центре. Эффекты при добавлении отражателей меньшей толщины аналогичны, но менее выражены.

Рассматривая потвэльное энерговыделение в ТВС, расположенных у края активной зоны, для моделей с отражателями толщиной 5 и 10 см, можно заметить повышение энерговыделения самых крайних твэлов у моделей с отражателями, причем с увеличением его толщины возрастает и энерговыделение (рис. 7) – относительно исходной модели разница достигает 82%. При этом энерговыделение твэлов периферийной ТВС, находящихся наиболее близко к центру активной зоны, также возрастает (в сравнении моделей без отражателя и с отражателем 10 см на 12%). Стрелками обозначено расположение центра активной зоны.

Таким образом, локальное повышение энерговыделения у моделей с отражателем приводит к его выравниванию в среднем по всей ТВС. Разница в энерговыделении твэлов с минимальным (на периферии) и максимальным (ближе к центру активной зоны) значениями в периферийной ТВС составляет 70%, в то время как для моделей с отражателями – 56% (толщина отражателя 5 см) и 43% (толщина отражателя 10 см), т.е. неравномерность потвэльного энерговыделения в периферийных ТВС снижается.

Investigation of the Effect of Using a Radial Reflector on the Neutron-Physical Characteristics of the Small-Module Reactors

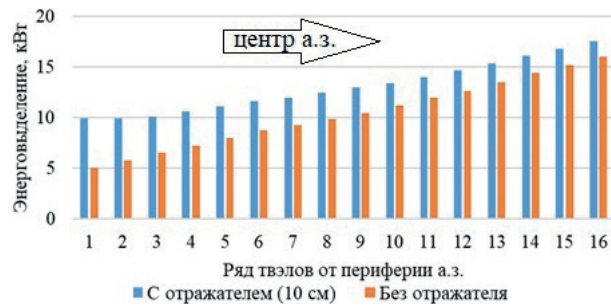


Рис. 7. Распределение энерговыделения по твэлам граничной ТВС в кВт

Трансмутация топлива

При рассмотрении всех вариантов моделирования кампаний оценивались выгрузки топлива из активной зоны и торцевой зоны воспроизводства. Определялись изотопные составы минорных актинидов и качество выгружаемого плутония. Количественные характеристики выгружаемого топлива из активной зоны и торцевой зоны воспроизводства представлены в табл. 2–7. Представлены составы минорных актинидов, плутония и расход ²³⁵U.

Таблица 2

Масса выгружаемого топлива из активной зоны

Элемент	Шаг 0 см 3600 эфф. сут., кг	Шаг 2 см 4410 эфф. сут., кг	Шаг 2 см 3600 эфф. сут., кг	Шаг 5 см 3600 эфф. сут., кг	Шаг 10 см 3600 эфф. сут., кг
Pu	508,37	715,92	417,67	496,30	511,13
Cm	0,002	0,019	0,001	0,0025	0,003
Am	0,12	0,67	0,05	0,11	0,13
Np	11,24	21,68	7,93	10,80	11,42
²³⁵ U	819,17	826,98	964,41	839,54	816,19

Таблица 3

Плутониевый вектор выгружаемого топлива из активной зоны

Изотоп	Шаг 0 см 3600 эфф. сут.	Шаг 2 см 4410 эфф. сут.	Шаг 2 см 3600 эфф. сут.	Шаг 5 см 3600 эфф. сут.	Шаг 10 см 3600 эфф. сут.
²³⁸ Pu	0,34%	0,75%	0,23%	0,33%	0,35%
²³⁹ Pu	93,59%	88,79%	95,01%	93,66%	93,38%
²⁴⁰ Pu	5,87%	9,88%	4,62%	5,79%	6,04%
²⁴¹ Pu	0,20%	0,54%	0,14%	0,21%	0,23%
²⁴² Pu	0,01%	0,04%	0,004%	0,007%	0,009%

Таблица 4

Изотопные составы минорных актинидов выгружаемого топлива из активной зоны

Изотоп	Шаг 0 см 3600 эфф. сут.	Шаг 2 см 4410 эфф. сут.	Шаг 2 см 3600 эфф. сут.	Шаг 5 см 3600 эфф. сут.	Шаг 10 см 3600 эфф. сут.
²⁴² Cm	95,18%	88,49%	96,63%	95,26%	94,90%
²⁴³ Cm	1,95%	3,02%	1,52%	1,88%	1,97%
²⁴⁴ Cm	2,77%	8,06%	1,81%	2,77%	3,04%
²⁴⁵ Cm	0,09%	0,42%	0,04%	0,08%	0,09%
²⁴⁶ Cm	0,002%	0,014%	0,001%	0,002%	0,002%
²⁴¹ Am	98,43%	96,92%	98,74%	99,27%	98,29%
^{242m} Am	0,74%	1,19%	0,59%	0,73%	0,75%
²⁴³ Am	0,84%	1,89%	0,67%	0,91%	0,96%

Таблица 5

Масса выгружаемого топлива из торцевой зоны воспроизводства

Элемент	Шаг 0 см 3600 эфф. сут., кг	Шаг 2 см 4410 эфф. сут., кг	Шаг 2 см 3600 эфф. сут., кг	Шаг 5 см 3600 эфф. сут., кг	Шаг 10 см 3600 эфф. сут., кг
Pu	92,24	157,8	72,33	90,91	94,82
Cm	0,000010	0,000290	0,000010	0,000030	0,000040
Am	0,0023	0,0334	0,0015	0,00442	0,0059
Np	0,18	0,37	0,13	0,18	0,19
²³⁵ U	13,75	13,74	14,05	13,77	13,71

Таблица 6

Плутониевый вектор выгружаемого топлива из торцевой зоны воспроизводства

Изотоп	Шаг 0 см 3600 эфф. сут.	Шаг 2 см 4410 эфф. сут.	Шаг 2 см 3600 эфф. сут.	Шаг 5 см 3600 эфф. сут.	Шаг 10 см 3600 эфф. сут.
²³⁸ Pu	0,01%	0,02%	0,01%	0,01%	0,01%
²³⁹ Pu	97,99%	96,18%	98,32%	97,85%	97,73%
²⁴⁰ Pu	1,98%	3,67%	1,64%	2,09%	2,20%
²⁴¹ Pu	0,02%	0,12%	0,03%	0,05%	0,06%
²⁴² Pu	0,0002%	0,0024%	0,0002%	0,0005%	0,0006%

Нептуний почти полностью представлен ²³⁷Np, поэтому в табл. 4 и 7 не отображен его изотопный состав.

Сравнивая наработку плутония в активной зоне для модели с шагом изменения толщины отражателя 2 см при двух разных длинах кампании (3600 и 4410 эфф. суток), можно отметить, что она увеличивается с течением времени, однако качество такого плутония ухудшается – содержание ²³⁹Pu у более короткой кампании 95,01%, в то время как у длинной 88,79%. Наличие отражателя любого размера незначительно влияет

Таблица 7

Изотопные составы минорных актинидов выгружаемого топлива из торцевой зоны воспроизводства

Изотоп	Шаг 0 см 3600 эфф. сут.	Шаг 2 см 4410 эфф. сут.	Шаг 2 см 3600 эфф. сут.	Шаг 5 см 3600 эфф. сут.	Шаг 10 см 3600 эфф. сут.
²⁴² Cm	99,09%	97,67%	99,40%	99,13%	99,01%
²⁴³ Cm	0,68%	1,30%	0,45%	0,62%	0,69%
²⁴⁴ Cm	0,23%	1,01%	0,15%	0,25%	0,30%
²⁴⁵ Cm	0,002%	0,017%	0,001%	0,002%	0,003%
²⁴⁶ Cm	0,000011%	0,000156%	0,000003%	0,000010%	0,000010%
²⁴¹ Am	99,71%	99,34%	99,78%	99,70%	99,66%
^{242m} Am	0,22%	0,45%	0,16%	0,22%	0,24%
²⁴³ Am	0,07%	0,22%	0,06%	0,09%	0,10%

на качество плутония. Отличие заметно лишь у модели с шагом 2 см и кампанией 3600 эфф. суток, однако оно вносит вклад не более 1,4% относительно других вариантов.

Для плутония из торцевой зоны воспроизводства также свойственна деградация его качества при удлинённой кампании, однако содержание ²³⁹Pu не опускается ниже 96% ни в одном из рассмотренных вариантов.

Доля минорных актинидов, нарабатываемых за время кампании, остается небольшой и составляет менее 1% при любых вариантах изменения шага графитового слоя. То же наблюдается и для торцевой зоны воспроизводства.

Для всех рассмотренных вариантов изменения толщины отражателя коэффициент накопления (КН) активной зоны (АЗ) остается меньше единицы (табл. 8). Со временем КН увеличивается из-за перехода зоны в подкритическое состояние. В торцевой зоне воспроизводства (ТЗВ) КН значительно больше из-за изначально малой концентрации делящихся ядер.

Таблица 8

Сравнение коэффициентов накопления в активной зоне и торцевой зоне воспроизводства

Баланс делящихся ядер	Загрузка	Выгрузка исход.	Выгрузка шаг 2 см 4410 эфф. сут.	Выгрузка шаг 2 см 3600 эфф. сут.	Выгрузка шаг 5 см 3600 эфф. сут.	Выгрузка шаг 10 см 3600 эфф. сут.
Масса, кг	1675,43	1400,11	1632,24	1446,99	1408,20	1401,08
КН АЗ	–	0,836	0,974	0,864	0,841	0,836
КН ТЗВ	–	6,886	10,956	5,632	6,791	7,037

Видно, что добавление отражателя негативно сказывается на КН ТЗВ при выгорании топлива 3600 эфф. суток, исключая вариант с размещаемым 10 см отражателем с начала кампании. При этом КН АЗ имеет обратную зависимость – чем ниже шаг добавляемого отражателя для компенсации реактивности на выгорание, тем выше КН на момент 3600 эфф. суток. Увеличение длительности кампании приводит к росту как КН АЗ, так и КН ТЗВ.

Заключение

Положение ОР СУЗ существенно влияет на эффективность отражателя (их роль высока из-за малых размеров реактора). Темпы потери реактивности у вариантов с отражателем и без него схожи. Добавление отражателя сверх 10 см в начале кампании незначительно влияет на $K_{эфф}$. Спектр сильно изменяется по радиусу активной зоны (на периферии он близок к тепловому, в центре – жесткий). На энерговыделение влияние отражателя незначительное в пределах центральной ТВС. При этом наблюдается выравнивание мощности делений в периферийной ТВС. Оптимальным вариантом постепенного увеличения размера отражателя на протяжении топливной кампании является шаг 2 см. Трансмутация нуклидов в исходной версии приводит к накоплению 600 кг плутония; при той же длине топливной кампании с отражателем плутония меньше (575–587 кг), но его чистота выше. При увеличенной кампании плутония накапливается больше, но его качество ухудшается.

Таким образом, полученные результаты позволяют сделать вывод о том, что добавление графитового отражателя позволяет улучшить нейтронно-физические характеристик малых модульных быстрых реакторов, включая значительное увеличение длины кампании. В дальнейшем планируется провести аналогичные исследования для бериллиевого отражателя и отражателя с гидридом циркония, позволяющие также повышать запас реактивности реактора, а также выравнивать поле энерговыделения [11–15].

Литература

1. Кочнов О.Ю., Колесов В.В., Фомин Р.В., Фомиченко П.А. Возможность увеличения числа экспериментальных каналов ВВР-ц за счет изменения конструкции активной зоны. *Атомная энергия*. 2018;125(3):146–148. URL: <http://j-atomicenergy.ru/index.php/ae/article/view/2217> (дата обращения 07.02.2025).
2. Голубев В.И., Звонарёв А.В., Николаев М.Н., Орлов М.Ю. Влияние отражателей из разных материалов на увеличение захватов нейтронов в урановом экране реактора на быстрых нейтронах. *Атомная энергия*. 1963;15(3):258–259. URL: https://elib.biblioatom.ru/text/atom-na-energiya_t15-3_1963/p258/ (дата обращения 07.02.2025).
3. Чекушина Л.В., Колточник С.Н., Сайранбаев Д.С., Гизатулин Ш.Х., Шаймерденов А.А., Накипов Д.А., Кенжин Е.А. Опыт эксплуатации ВВР-К с бериллиевым отражателем и низкообогащенным урановым топливом. *Атомная энергия*. 2021;130(5):295–298. URL: <http://ar.j-atomicenergy.ru/index.php/ae/article/view/4307/5040> (дата обращения 07.02.2025).
4. Колесов В.В., Коробейников В.В., Гурская О.С., Пупко Л.П. Исследование эффективности отражателей из различных материалов в реакторах на быстрых нейтронах малой мощности. *Вопросы атомной науки и техники. Сер.: Ядерно-реакторные константы*. 2025;1:64–74. URL: <https://vant.ippe.ru/year2025/1/neutron-constants/2625-6.html> (дата обращения 07.02.2025).
5. Селезнев Е.Ф. Кинетика реакторов на быстрых нейтронах. М.: Наука, 2013, 239 с. ISBN 978-5-02-038479-8. URL: <https://ibrae.ac.ru/docs/109/seleznev.pdf> (дата обращения 07.02.2025).
6. Дьяченко А.И., Федоров М.И., Соловьев С.В., Балагуров Н.А., Артисюк В.А. Расчетные исследования в обоснование защищенности топливного цикла реактора СВБР-100 при использовании регенерированного урана. *Известия вузов. Ядерная энергетика*. 2014;4:71–81. DOI: <https://doi.org/10.26583/npe.2014.4.08>
7. Жуков А.В., Кузина Ю.А., Белозеров В.И. Реакторы с тяжелым теплоносителем и некоторые теплогидравлические данные для них. *Известия вузов. Ядерная энергетика*. 2011;3:100–136.

URL: <https://static.nuclear-power-engineering.ru/articles/2011/03/13.pdf> (дата обращения 07.02.2025).

8. Leppänen J. PSG2 / Serpent – a Continuous-energy Monte Carlo Reactor Physics Burnup Calculation Code. March 5, 2012 User's Manual. 163 p. URL: https://serpent.vtt.fi/serpent/download/Serpent_manual.pdf (дата обращения 07.02.2025).

9. Santamarina A., Bernard D., Blaise P. The JEFF-3.1.1 Nuclear Data Library JEFF Report 22. Validation Results from JEF-2.2 to JEFF-3.1.1. ISBN 978-92-64-99074-6, OECD, 2009. URL: <https://oecd-nea.org/upload/docs/application/pdf/2020-08/jefreport-22.pdf> (дата обращения 07.02.2025).

10. Зродников А.В., Тошинский Г.И., Григорьев О.Г. и др. Модульный быстрый реактор малой мощности со свинцово-висмутовым теплоносителем для многоцелевого применения СВБР-75/100. *Атомная энергия*. 2004;97(2):91–98. URL: <https://www.j-atomicenergy.ru/index.php/ae/article/view/3353> (дата обращения 07.02.2025).

11. Кочнов О.Ю., Колесов В.В. Влияние бериллиевого отражателя, помещенного в активную зону реактора ВБР-ц, на ее нейтронно-физические характеристики. *Известия вузов. Ядерная энергетика*. 2012;2:22–25. URL: <https://static.nuclear-power-engineering.ru/articles/2012/02/03.pdf> (дата обращения 07.02.2025).

12. Сайранбаев Д.С., Колточник С.Н., Шаймерденов А.А., Тулегенов М.Ш., Кенжин Е.А., Цучия К. Динамика изменения эксплуатационных параметров реактора ВБР-К при постепенной замене водяного отражателя на бериллиевый. *Известия вузов. Физика*. 2020;63(12):102–113. DOI: <https://doi.org/10.17223/00213411/63/12/102>

13. Гидриды металлов (пер. с англ.). М.: Атомиздат, 1973, 432 с. URL: <http://chemteq.ru/library/inorganic/2017.html> (дата обращения 07.02.2025).

14. Ма Б.М. Материалы ядерных энергетических установок (пер. с англ.). М.: Энергоатомиздат, 1987, 408 с. URL: https://elib.biblioatom.ru/text/ma_materialy-yadernyh-energeticheskikh-ustanovok_1987/p0/ (дата обращения 07.02.2025).

15. Кузнецов В.А. Ядерные реакторы космических энергетических установок. М.: Атомиздат, 1977, 240 с. URL: https://elib.biblioatom.ru/text/kuznetsov_yadernye-reaktory-kosmicheskikh_1977/p0/ (дата обращения 07.02.2025).

Поступила в редакцию 16.04.2025

После доработки 09.03.2026

Принята к опубликованию 10.09.2026

Авторы

Воронцова Александра Александровна, студент,

E-mail: paradisecitymake@gmail.com

Внуков Руслан Адхамович, старший преподаватель,

E-mail: levz555@mail.ru

Колесов Валерий Васильевич, доцент, к.ф.-м.н.,

E-mail: valeri-kolesov@yandex.ru

UDC: 621.039.5

Investigation of the Effect of Using a Radial Reflector on the Neutron-Physical Characteristics of the Small-Module Reactors**Vorontsova A.A., Vnukov R.A., Kolesov V.V.***OINPE MEFPI,**1 Studgorodok, 249039 Obninsk, Kaluga reg., Russia***Abstract**

Small-module installations are convenient due to their small size, which allows them to be installed in places unsuitable for the placement of power reactors. However, this advantage is also their disadvantage: the small size of the core leads to an increase in neutron leakage. One of the ways to solve this problem may be to use a neutron reflector made of various materials. This work is devoted to the study of the effect of a graphite reflector placed behind the reactor vessel on the neutron-physical characteristics of small-module reactors using the SVBR-100 reactor model as an example. It is proposed to consider the effect of reflector thickness on the spectrum of neutrons, energy release and duration of the fuel campaign. Models with a step-by-step increase in the graphite layer during the campaign from 0 to 20 cm in increments of 2, 5 and 10 cm are proposed. With this approach, there is no reflector at the beginning of the campaign, and the thickness of the reflector changes when the K_{eff} value is less than 1,000. When modeling such a campaign, it was noticed that each of the considered steps allows you to get a gain in the length of the fuel campaign, which turns out to be almost identical. The use of a reflector has a strong effect on peripheral fuel assemblies: the placement of the reflector leads to an equalization of energy release within the fuel assemblies, and also contributes to the shift of the neutron spectrum to the thermal region, while the center of the core remains virtually unchanged. When considering the composition of the discharged fuel at the end of the campaign for models with a reflector, there is a decrease in the amount of plutonium compared to the initial model, but its purity improves. At the same time, the size of the reflector does not affect the quality of plutonium. The proportion of minor actinides remains less than 1% for all the models under consideration. In general, the use of a graphite reflector has a positive effect on the neutron-physical characteristics of the reactor, including increasing the length of the campaign and equalization of the energy release field. In the future, it is planned to study other reflector materials, such as beryllium and zirconium hydride.

Keywords: neutron reflector, graphite, energy release, neutron spectrum, isotopic composition.

For citation: Vorontsova A.A., Vnukov R.A., Kolesov V.V. Investigation of the Effect of Using a Radial Reflector on the Neutron-Physical Characteristics of the small-module reactors. *Izvestiya vuzov. Yadernaya Energetika*. 2026;3:182–195. DOI: <https://doi.org/10.26583/npe.2026.3.13> (in Russian).

References

1. Kochnov O.Yu., Kolesov V.V., Fomin R.V., Fomichenko P.A. Possibility of Increasing the Number of Experimental Channels in VVR-Ts by Changing the Core Design. *Atomic Energy*. 2019;125(3):162–164. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10512-018-00460-7>
2. Golubev V.I., Zvonarev A.V., Nikolaev M.N., Orlov M.Yu. Influence of reflectors made of different materials on the increase in neutron captures in the uranium screen of a fast neutron reactor. *Atomnaya Energiya*. 1963;15(3):258–259. URL: https://elib.biblioatom.ru/text/atomnaya-energiya_t15-3_1963/p258/ (accessed Feb. 07, 2025) (in Russian).

3. Chekushina L.V., Koltochnik S.N., Sayranbaev D.S., Gizatulin Sh.K., Shaimerdenov A.A., Nakipov D.A., Kenzhin E.A. Experience of Operating VVR-K with a Beryllium Reflector and Low-Enriched Uranium Fuel. *Atomic Energy*. 2021;130(5):314–317. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10512-021-00816-6>
4. Kolesov V.V., Korobeinikov V.V., Gurskaya O.S., Pupko L.P. Study of the Efficiency of Reflectors Made of Different Materials in Low-Power Fast Neutron Reactors. *Problems of Atomic Science and Technology. Series: Nuclear and Reactor Constants*. 2025;1:64–74. URL: <https://vant.ippe.ru/year2025/1/neutron-constants/2625-6.html> (accessed Feb. 07, 2025) (in Russian).
5. Seleznev E.F. Kinetics of fast neutron reactors. Moscow, Nauka Publ., 2013. 239 p. ISBN 978-5-02-038479-8. URL: <https://ibrae.ac.ru/docs/109/seleznev.pdf> (accessed Feb. 07, 2025) (in Russian).
6. Dyachenko A.I., Fedorov M.I., Solovyev S.V., Balagurov N.A., Artisyuk V.A. Calculation studies to substantiate the security of the SVBR-100 reactor fuel cycle using regenerated uranium. *Izvestia vuzov. Yadernaya Energetika*. 2014;4:71–81. DOI: <https://doi.org/10.26583/npe.2014.4.08> (in Russian).
7. Zhukov A.V., Kuzina Yu.A., Belozerov V.I. Reactors with heavy coolant and some thermohydraulic data for them. *Izvestia vuzov. Yadernaya Energetika*. 2011;3:100–136. URL: <https://static.nuclear-power-engineering.ru/articles/2011/03/13.pdf> (accessed Feb. 07, 2025) (in Russian).
8. Leppänen J. PSG2 / Serpent – a Continuous-energy Monte Carlo Reactor Physics Burnup Calculation Code. March 5, 2012. User's Manual. 163 p. URL: https://serpent.vtt.fi/serpent/download/Serpent_manual.pdf (accessed Feb. 07, 2025).
9. Santamarina A., Bernard D., Blaise P. The JEFF-3.1.1 Nuclear Data Library JEFF Report 22. Validation Results from JEF-2.2 to JEFF-3.1.1. ISBN 978-92-64-99074-6, OECD, 2009. URL: <https://oecd-neo.org/upload/docs/application/pdf/2020-08/jefreport-22.pdf> (accessed Feb. 07, 2025).
10. Zrodnikov A.V., Toshinskii G.I., Grigor'ev O.G. et al. SVBR-75/100 Multipurpose Modular Low-Power Fast Reactor with Lead–Bismuth Coolant. *Atomic Energy*. 2004;97(2):528–533. DOI: <https://doi.org/10.1023/B:ATEN.0000047677.16291.f2>
11. Kochnov O.Yu., Kolesov V.V. Influence of a beryllium reflector placed in the core of the VVR-ts reactor on its neutron-physical characteristics. *Izvestia vuzov. Yadernaya Energetika*. 2012;2:22–25. URL: <https://static.nuclear-power-engineering.ru/articles/2012/02/03.pdf> (accessed Feb. 07, 2025) (in Russian).
12. Sayranbaev D.S., Koltochnik S.N., Shaimerdenov A.A., Tulegenov M.Sh., Kenzhin E.A., Tsuchiya K. Dynamics of changes in the operational parameters of the VVR-K reactor during the gradual replacement of the water reflector with a beryllium one. *Izvestiya vuzov. Fizika*. 2020;63(12):102–113. DOI: <https://doi.org/10.17223/00213411/63/12/102> (in Russian).
13. Metal Hydrides (transl. from engl.). Moscow, Atomizdat Publ., 1973, 432 p. URL: <http://chemteq.ru/library/inorganic/2017.html> (accessed Feb. 07, 2025) (in Russian).
14. Ma B.M. (transl. from engl.). Materials of nuclear power plants. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1987, 408 p. URL: https://elib.biblioatom.ru/text/ma_materialy-yadernyh-energetich-eskih-ustanovok_1987/p0/ (accessed Feb. 07, 2025) (in Russian).
15. Kuznetsov V.A. Nuclear reactors of space power plants. Moscow, Atomizdat Publ., 1977, 240 p. URL: https://elib.biblioatom.ru/text/kuznetsov_yadernye-reaktory-kosmicheskikh_1977/p0/ (accessed Feb. 07, 2025) (in Russian).

Authors

Alexandra A. Vorontsova, student,

E-mail: paradisecitymake@gmail.com

Ruslan A. Vnukov, Senior lecturer,

E-mail: levz555@mail.ru

Valery V. Kolesov, Associate Professor, Cand. Sci. (Phys.-Math.),

E-mail: valeri-kolesov@yandex.ru