

ПРОЕКТИРОВАНИЕ, ИЗГОТОВЛЕНИЕ И ВВОД
В ЭКСПЛУАТАЦИЮ ОБОРУДОВАНИЯ
ОБЪЕКТОВ АТОМНОЙ ОТРАСЛИ
DESIGN, MANUFACTURE AND COMMISSIONING
COMMISSIONING OF EQUIPMENT
NUCLEAR INDUSTRY FACILITIES

<https://doi.org/10.26583/gns-2025-02-03>

EDN EOQCEC

Оригинальная статья / Original paper



Пустотный эффект реактивности в многоцелевом тестовом
исследовательском реакторе МТИР-СКД

А.С. Лапин , Ю.Н. Волков , С.А. Субботин 

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», г. Москва, Российская Федерация

Научно-исследовательский центр «Курчатовский институт», г. Москва, Российская Федерация

✉ Lapin_AS@nrcki.ru

Аннотация. В данной работе рассматривается проблема положительного пустотного эффекта реактивности для реакторов, работающих в быстром спектре нейтронов, в частности для реактора ВВЭР-СКД. Актуальность исследования обусловлена необходимостью обеспечения безопасности данных реакторов в условиях запроектных аварий. Исследование фокусируется на применении реактора МТИР-СКД как экспериментальной платформы для анализа пустотного эффекта реактивности. Показано, что изменение состава топлива и отражателей позволяет получать пустотный эффект реактивности различного знака. На первом этапе работы с реактором предполагается реализация отрицательного пустотного эффекта реактивности для гарантии безопасности, в дальнейшем возможно его изменение на положительный. В первой части работы проведены расчеты балансов нейтронов, выявляющие механизмы формирования пустотного эффекта реактивности. Результаты показывают, что стальной отражатель и изотоп плутония-240 существенно влияют на положительный пустотный эффект реактивности. Также обсуждаются варианты достижения отрицательного и нулевого пустотного эффекта реактивности, а также достижения положительного эффекта с использованием высокофонового плутония, что исключает риск неуправляемого разгона реактора. Полученные результаты могут послужить основой для обоснования безопасной эксплуатации реактора ВВЭР-СКД с положительным пустотным эффектом реактивности. Данная работа имеет как научное, так и практическое значение для разработки и проектирования безопасных ядерных реакторов нового поколения, обеспечивающих надежное управление реактивностью в различных эксплуатационных условиях.

Ключевые слова: МТИР-СКД, ВВЭР-СКД, пустотный эффект реактивности, запроектные аварии, баланс нейтронов в реакторе, безопасность реактора.

Для цитирования: Лапин А.С., Волков Ю.Н., Субботин С.А. Пустотный эффект реактивности в многоцелевом тестовом исследовательском реакторе МТИР-СКД. *Глобальная ядерная безопасность*. 2025;15(2):24–35. <https://doi.org/10.26583/gns-2025-02-03>

For citation: Lapin A.S., Volkov Yu.N., Subbotin S.A. Void reactivity effect in the MTIR-SKD multipurpose test research reactor. *Nuclear Safety*. 2025;15(2):24–35. (In Russ.). <https://doi.org/10.26583/gns-2025-02-03>

Void reactivity effect in the MTIR-SKD multipurpose test research reactor

Anton S. Lapin , Yuriy N. Volkov , Stanislav A. Subbotin 

National Research Nuclear University «MEPhI», Moscow, Russian Federation

Scientific Research Center «Kurchatov Institute», Moscow, Russian Federation

✉ Lapin_AS@nrcki.ru

Abstract. This scientific article discusses the problem of the positive void reactivity effect for reactors operating in the fast neutron spectrum, in particular for the VVER-SKD reactor. The relevance of the study is due to the need to ensure the safety of these reactors in the conditions of out-of-design accidents. The research focuses on the MTIR-SKD reactor application as an experimental platform for peer analysis. It is shown that changing the composition of the fuel and

reflectors makes it possible to obtain a void reactivity effect of a different sign. It is assumed that a negative void reactivity effect will be implemented to ensure safety at the first stage of work with the reactor, and later it may be changed to a positive one. In the first part of the work calculations of neutron balances are carried out, revealing the mechanisms of the void reactivity effect formation. The results show that the steel reflector and the plutonium-240 isotope significantly affect the positive void reactivity effect. Options to achieve negative and zero void reactivity effect also being discussed as well as achieving a positive effect using high-carbon plutonium which eliminates the risk of uncontrolled reactor overlocking. The results obtained can serve as a basis for justifying the safe operation of the VVER-SKD reactor with a positive void reactivity effect. This work has both scientific and practical significance for the development and design of safe new generation nuclear reactors that provide reliable reactivity control in various operating conditions.

Keywords: MIR-SKD, VVER-SKD, void reactivity effect, out-of-design accidents, neutron balance in the reactor, reactor safety.

Введение

Проблема положительного пустотного эффекта (ПЭР), т.е. ввода положительной реактивности при быстром и полном опустошении активной зоны реактора является важной для большинства установок с быстрым спектром нейтронов, работающих на уран-плутониевом топливе.

Данная проблема подробно изучена для реакторов с натриевым теплоносителем. Протекание такого аварийного процесса возможно при неконтролируемом развитии аварии, когда вскипанию и выбросу натрия предшествует уменьшение теплосъема [1]. Это приводит к ужесточению спектра нейтронов и уменьшению соотношения между захватами и делениями на изотопе плутония-239. Кроме этого исчезает непосредственное поглощение нейтронов ядрами натрия. Однако, при этом возрастает утечка нейтронов из активной зоны, что создает отрицательную компоненту вклада в ПЭР. Баланс между этими факторами и определяет интегральный ПЭР. Опасность пустотного эффекта реактивности связана с тем, что может произойти разгон реактора на мгновенных нейтронах [2].

Требование нулевого интегрального ПЭР появилось для натриевых реакторов после аварии на Чернобыльской АЭС [3]. Для достижения данного требования было предложено отказаться от верхней торцевой зоны воспроизводства и использовать сверху активной зоны натриевую полость, так, чтобы при удалении натрия из нее вводилась отрицательная реактивность из-за повышающейся при этом утечки нейтронов. Это накладывает особенности на конструкцию активной

зоны: наблюдается сильно уплощенный вариант активной зоны, для повышения аксиальной утечки. Однако, достижение таким путем отрицательного ПЭР снижает технико-экономические показатели АЭС с реактором БН, а также снижает возможности выработки вторичного топлива, т.е. снижается коэффициент воспроизводства [4].

Сегодня, согласно правилам ядерной безопасности реакторных установок атомных станций НП-082-07, для реакторов БН при протекании запроектных аварий допустимый интервал значений ПЭР должен быть обоснован в проекте. Таким образом, существующая нормативная база не накладывает ограничений на знак и значения ПЭР в реакторах БН, а лишь регламентирует необходимость обоснования безопасности РУ при протекании аварий в таком реакторе.

В проектируемом реакторе БН-1200 конструкция активной зоны предусматривает и размещение натриевой полости, и отсутствие верхней торцевой зоны воспроизводства, однако значения ПЭР – удаление натрия из натриевой полости, верхней части ТВЭлов и активной части ТВС дает положительные значения, как и удаление натрия только из активной зоны [5]. Кроме того, проводились исследования применения в данном реакторе различных типов топлива (наряду с оксидным топливом рассмотрено нитридное). Для всех рассмотренных случаев ПЭР положителен [6]. При этом в проекте такого реактора с положительным ПЭР обосновывается приемлемый уровень безопасности [7].

В реакторах с водяным теплоносителем вариант с мгновенным введением реактив-

ности, обусловленной положительным значением ПЭР, не может быть осуществлен, поскольку теплоноситель находится в активной зоне под высоким давлением и необходимо достаточное время (порядка 10-15 секунд) для полного его истечения [8].

Стоит отметить, что наиболее важным параметром в рассматриваемом аварийном процессе является не значение ПЭР, а скорость его введения. Кроме этого, даже при отрицательном ПЭР при потере охлаждения активной зоны будет происходить нагрев топлива с последующим его плавлением. Это объясняется тем, что любой, даже остановленный реактор является источником энерговыделения и требует отвода тепла. Потеря теплоносителя – это в первую очередь потеря охлаждения ТВЭЛов активной зоны и риск достижения в них температур плавления как оболочки, так и топлива, что может привести к выходу радионуклидов в окружающую среду [7]. При этом размер аварии будет определяться не значениями и знаком ПЭР, а тепловой мощностью установки.

Целью создания реактора ВВЭР-СКД наряду с повышением коэффициента полезного действия и снижением удельных капитальных затрат является повышение воспроизводства ядерного топлива в реакторе вплоть до возможности работы такого реактора в режиме самообеспечения топливом, т.е. коэффициент воспроизводства (КВ) с учетом возможных потерь при переработке должен составлять не менее 1,05 [9]. Достижение таких значений КВ вполне возможно при использовании тесной решетки ТВЭЛов и низкой плотности теплоносителя ($0,1-0,2 \text{ г/см}^3$). Однако, при этом достигается положительный ПЭР. Существует техническая возможность достижения отрицательных значений пустотного эффекта реактивности, однако в этом случае происходит снижение воспроизводства вторичного ядерного топлива.

Существующими нормативными документами не регламентируется знак и значения ПЭР, а при протекании аварийных процессов, связанных с потерей охлаждения активной зоны должна быть доказана безопасность установки. Такое эксперимен-

тальное обоснование безопасности реактора ВВЭР-СКД с положительным пустотным эффектом в такого рода аварийных процессах может быть проведено на тестовом реакторе МТИР-СКД [10].

Эксплуатация МТИР-СКД предполагается в две стадии: тестовая и исследовательская. В рамках тестовой стадии эксплуатации МТИР-СКД важное внимание должно уделяться достижению заложенных при проектировании параметров систем, чтобы выявить возможные риски и обеспечить максимальную безопасность эксплуатации [11]. Основным акцентом будет являться оценка динамических характеристик реактора при различных режимах работы и испытаний основного и вспомогательного оборудования.

Наряду с этим на тестовой стадии также возможно проведение обоснования безопасности реактора со сверхкритическими параметрами легководного теплоносителя с положительным пустотным эффектом. Для этого ключевыми аспектами проектирования являются наличие систем активного и пассивного охлаждения, а также быстро реагирующие автоматизированные системы контроля. Необходимо создать надежную систему безопасности, учитывающую различные сценарии, включая аварийные ситуации, чтобы гарантировать возможность быстрого снижения мощности.

Таким образом, целью данной статьи является исследования возможности достижения пустотного эффекта реактивности различного знака без изменений в конструкции реактора, а лишь за счет изменения материального состава топлива активной зоны и отражателя.

Методология исследования

Под базовым вариантом реактора МТИР-СКД понимается реактор с активной зоной объемом 500 литров, окруженной стальным отражателем. Изотопный состав плутония в свежем топливе соответствует составу ОЯТ реактора ВВЭР-1000 после выдержки и переработки. Вектор изотопного состава плутония, % (Pu-238/Pu-239/Pu-240/Pu-241/Pu-242) – 2,6/58,6/26,4/5,5/6,9. Представленные в данной статье результаты получены при использовании прецизионного кода

MCNP5, и библиотеки ядерных данных, сформированной на базе стандартных ENDF/B-VII.0 – файлов. Расчет выгорания ядерного топлива проводился с использованием ПК ISTAR-2.06 – программной системы моделирования изотопной кинетики в реакторных расчетах с использованием прецизионного кода MCNP5.

Нейтронно-физическая модель представляет собой реактор с объемом активной зоны 500 литров и включает в себя детальное описание всех ключевых элементов, составляющих активную зону реактора и ее окружения: твэлов, ТВС, сборок отражателя, выгородки, шахты, корпуса, а также пространства над и под ТВС.

Проведены расчеты выгорания топлива для каждого из рассмотренных вариантов. Во всех расчетах задавалась активная зона со свежим топливом заданного состава во всех ТВС, и проводился расчет пяти микрокампаний по 90 эффективным суткам каждая, без каких-либо перестановок или замен ТВС и без выдержек топлива во время перегрузок. Топливо в активной зоне разбивалось на восемь физических зон – три радиальные, соответствующие трем зонам по содержанию плутония, двум аксиальным (верхняя и нижняя часть активной зоны), а также верхний торцевой экран и нижний торцевой экран, т.е. в расчетах рассматривались изотопные составы, усредненные по этим зонам.

Теплоноситель разбивался на 8 аксиальных зон, шесть из которых равномерно расположены в активной зоне, а две в торцевых экранах. После расчета выгорания производилось усреднение пяти изотопных составов (на начало каждой микрокампании) для каждой зоны топлива и получались свежие составы, соответствующие началу микрокампании. Для данных составов производился расчет выгорания в течение одной микрокампании (90 суток). Для каждого варианта получены расчетные модели с составами, соответствующими началу и концу микрокампании. Для каждого из вариантов для двух состояний проведены расчеты пустотного эффекта реактивности

После получения составов для выгоревшего топлива, соответствующего середине

микрокампании, в модели выделяются 17 различных зон, каждая из которых обладает своими характеристиками, как с точки зрения конструктивных особенностей и материалов, так и нейтронно-физических свойств. Для каждой из зон проводятся расчетные анализы взаимодействия нейтронов с различными нуклидами.

Рассматривается 125 нуклидов, которые входят в состав материалов, составляющих конструкцию реактора. Кроме того, модель позволяет рассчитать утечку нейтронов из активной зоны и из реактора в целом.

Рассматриваются четыре различных состава топлива, для которых оценены балансы нейтронов и значения ПЭР:

1. Плутоний базового варианта МТИР-СКД [10].
2. Плутоний, использующийся в качестве топлива реактора БН-800 [12,13].
3. Плутоний, планируемый к использованию в реакторе МБИР.
4. Урановое топливо.

В начале эксплуатации в МТИР-СКД должен реализовываться отрицательный пустотный эффект реактивности, который обеспечивается за счет наличия боковой зоны воспроизводства из обедненного диоксида урана, а также с изотопным составом плутония с низким содержанием изотопа плутония-240. В этом состоянии проводятся тестовые испытания и экспериментальное обоснование основного и вспомогательного оборудования, обосновывается работоспособность топлива на номинальных параметрах энерговыделения, а также обосновывается реализация устойчивого теплосъема с поверхности твэлов теплоносителем с СКД параметрами.

После успешного экспериментального решения данных задач и полного обоснования работоспособности всех систем реактора МТИР-СКД, топливо активной зоны постепенно заменяется на свежее с более низким содержанием изотопа плутония 239, что приводит к поэтапному достижению слабоположительного пустотного эффекта реактивности (не более 1 \$). В этом состоянии в реакторе с использованием автономных петлевых устройств обосновывается без-

опасность установки с такими нейтронно-физическими характеристиками.

На третьем этапе боковой урановый отражатель заменяется на стальной, что обеспечивает достижение положительного пустотного эффекта реактивности на уровне энергетического реактора ВВЭР-СКД. В этом состоянии проводится обоснование безопасной эксплуатации реактора ВВЭР-СКД с положительным пустотным эффектом, посредством экспериментального моделирования аварий с потерей теплоносителя как в автономных петлевых устройствах, так и в реакторе в целом.

Результаты

Анализ механизмов реализации пустотного эффекта реактивности в базовом варианте

Рассмотрим утечку нейтронов из активной зоны. В таблице 1 приведено число нейтронов, пересекающих границу активной зоны как в положительном, так и в отрицательном направлении, а также суммарная утечка нейтронов.

Таблица 1. Изменение утечки нейтронов при опустошении базового варианта реактора МТИР-СКД*

Table 1. Changing the neutron leakage during the emptying of the MTIR-SK reactor basic version *

Состояние	Вылетающие из активной зоны	Влетающие в активную зону	Утечка нейтронов из активной зоны
Номинальное состояние	2063	1338	725
Опустошение активной зоны	3215	2072	1142
Полное опустошение реактора	3567	2509	1058

*Нормировка проводилась на 1000 нейтронов, вызвавших деление в активной зоне

Как видно из таблицы, при опустошении как всего реактора, так и активной зоны существенно возрастает число нейтронов, вылетающих за границу активной зоны, по сравнению с номинальным состоянием. Это объясняется ужесточением спектра нейтронов из-за отсутствия замедляющих ядер водорода в активной зоне. Однако, при этом возрастает и число нейтронов, которые возвращаются в активную зону. Суммарная

утечка нейтронов при опустошении возрастает. При этом при опустошении только активной зоны ее значения больше, чем при полном опустошении реактора, что связано с существенным снижением поглощений на стальных стержнях отражателя (сечение поглощения на железе-56 снижается с 0,09 до 0,05 барн) и увеличении вероятности рассеяния нейтронов в нем (полное сечение взаимодействия увеличивается с 9 до 18 барн). Эти факторы позволяют сделать вывод, что при отсутствии теплоносителя в отражателе его отражающие свойства улучшаются.

Вклад в пустотный эффект реактивности различных элементов конструкции представлен в таблице 2. В данной таблице не представлен теплоноситель, охлаждающий активную зону и стержни отражателя, поскольку его прямой вклад в пустотный эффект реактивности незначителен и составляет менее 2 нейтронов на 1000 нейтронов, вызвавших деление. Это связано с низкой плотностью теплоносителя и малой его долей в активной зоне реактора, что приводит к практически полному отсутствию захватов на ядрах теплоносителя.

Таблица 2. Вклад различных элементов конструкции МТИР-СКД в интегральный пустотный эффект реактивности*

Table 2. Contribution of various MTIR-SKD structural elements to the integral void reactivity effect*

Элемент конструкции реактора	Опустошение реактора	Опустошение активной зоны
Корпус	-128	-21
Опускной участок теплоносителя	13	-7
Выгородка	9	-26
Сталь в отражателе	82	-223
Сталь в ТВС активной зоны	6	7
Сталь в ТВС вне активной зоны	31	-38
Топливо НТЗВ	-8	-32
Топливо активной зоны	339	327
Топливо ВТЗВ	-4	-25
Торцевой отражатель	-93	-44
Утечка из реактора	-237	1
Суммарный ПЭР	9	-81

*Нормировка проводилась на 1000 нейтронов, вызвавших деление в активной зоне

Основной вклад в положительную компоненту пустотного эффекта реактивности дает топливо активной зоны, а именно плутоний-239 (рис. 1), что объясняется в значительной степени изменением спектра. Также значителен вклад изотопа плутония-240, который имеет такой же вклад в пустотный эффект реактивности, как и изотоп плутония-239, несмотря на то, что его концентрация в три раза меньше, чем концентрация плутония-239. Это объясняется существенным снижением сечения радиационного за-

хвата с 1,2-1,5 барн до 0,3-0,4 барн. Таким образом, можно сказать что изотоп плутония-240 оказывает влияние на пустотный эффект реактивности как напрямую, так и косвенно. Прямая зависимость заключается в непосредственном снижении сечения захвата нейтронов, а косвенная зависимость связана с необходимостью добавления в топлива дополнительно делящегося плутония-239 с целью компенсации паразитного захвата нейтронов плутонием-240.

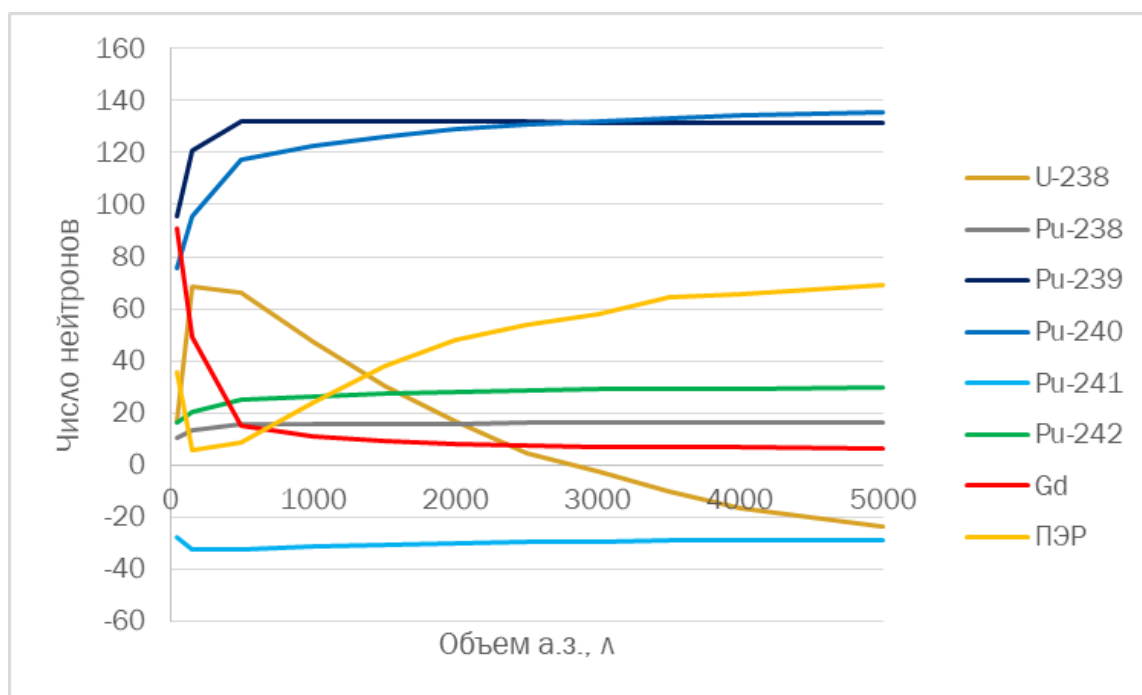


Рисунок 1. Вклад нуклидов в топливо в ПЭР
Figure 1. Contribution of nuclides in fuel of primary energy resources

Корпус реактора и внутрикорпусные устройства оказывают существенное влияние на пустотный эффект реактивности при полном опустошении реактора. Это связано с возрастанием доли нейтронов утечки из активной зоны при переходе из номинального состояния в опустошенное, а также отсутствием замедлителя в отражателе, что приводит к ужесточению спектра нейтронов вне активной зоны и снижению сечения захвата нейтронов.

При полном опустошении реактора наблюдаются противоположные по знаку эффекты, влияющие на ПЭР. С одной стороны, к росту ПЭР должно приводить ужесточение спектра нейтронов в корпусе и внутрикорпусных устройствах, вызванное

отсутствием замедлителя, что приводит к снижению сечения захвата в стали и улучшению ее отражающих свойств. С другой стороны, происходит рост плотности потока нейтронов в корпусе за счет ужесточения спектра нейтронов и увеличения утечки. Плотность потока нейтронов в корпусе реактора увеличивается при опустошении в 30 раз, поэтому именно она и определяет отрицательный вклад корпуса реактора в пустотный эффект реактивности.

Аналогично корпусу реактора, в стали отражателя на пустотный эффект реактивности влияют два фактора, имеющие различный знак с точки зрения влияния на пустотный эффект реактивности: изменение спектра, т.е. изменение сечения захвата нейтронов

и изменение плотности потока нейтронов в отражателе за счет увеличения утечки из активной зоны. Однако, в отличие от корпуса реактора, в случае стального отражателя основную роль в формировании пустотного эффекта реактивности играет более существенное снижение сечения захвата в сравнении с увеличением плотности потока нейтронов, что обуславливает положительный вклад стального отражателя в пустотный эффект реактивности.

Необходимо отметить, что сталь, расположенная в ТВС активной зоны (оболочки твэлов и чехлы ТВС на уровне топлива активной зоны) практически не оказывает влияния на пустотный эффект реактивности.

В целом, сталь в активной зоне может оказывать как прямое, так и косвенное воздействие на пустотный эффект реактивности. Под прямым воздействием понимается снижение захвата нейтронов при опустошении реактора. Под косвенным воздействием понимается введение дополнительного количества плутония в топливо активной зоны, которое необходимо для сохранения критичности из-за паразитного захвата на стали.

Возможность достижения отрицательных значений ПЭР в реакторе МТИР-СКД

Из проведенного анализа механизмов реализации пустотного эффекта реактивности следуют два фактора, которые как каждый сам по себе, так и в совокупности могут снизить значения пустотного эффекта реактивности как до нулевого уровня, так и до отрицательных значений.

Первый из них – это изменения состава всего или части отражателя. Поскольку сталь имеет существенное изменение отражающих свойств при ужесточении спектра, то в месте расположения отражателя необходимо использовать материалы с меньшим диапазоном изменения сечения радиационного захвата. Предлагается заменить три ряда сборок стального отражателя на ТВС зоны воспроизводства, состоящих из 19 твэлов с обедненным ураном. Использование 37 твэлов, как в ТВС активной зоны имеет меньшее влияние на снижение пустотного эффекта реактивности, поскольку в таких сборках объемная доля топливных материа-

лов меньше. Использование же 7 твэлов, как и в сборке стального отражателя имеет лучшее воздействие на снижение пустотного эффекта, однако в этом случае могут возникнуть проблемы с обеспечением их охлаждения. Конструкция сборки представлена на рисунке 2.

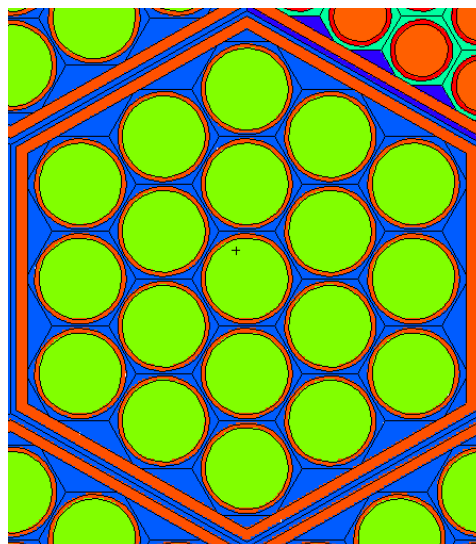


Рисунок 2. ТВС боковой зоны воспроизводства МТИР-СКД

Figure 2. Fuel assemblies of the lateral zone of MTIR-SKD reproduction

Таблица 3. Параметры различного типа сборок реактора МТИР-СКД

Table 3. Parameters of different types of MTIR-SCD reactor assemblies

Параметр	ТВС активной зоны	Сборка стального отражателя	ТВС боковой зоны воспроизводства
Число стержней в конструкции, шт	37	7	19
Диаметр сердечника, мм	7,2	21	11,2
Толщина оболочки, мм	0,6	-	0,6
Шаг размещения в сборке, мм	9,58	21	13

Вторым способом уменьшения пустотного эффекта реактивности является использование низкофонового плутония с меньшим содержанием четных изотопов. Как показали исследования, представленные в предыдущем разделе, влияние на ПЭР каждого ядра изотопа плутония-240 в три раза существеннее, чем ядра плутония-239. В составе плу-

тония с более низким содержанием плутония-240 снижено и количество плутония-241, имеющего отрицательный вклад в пустотный эффект. Однако в целом переход на более низкофоновый состав плутония позволяет снизить значения ПЭР. Рассмотрены несколько таких изотопных составов

Кроме этого, необходимо принимать во внимание то, что начало работы МТИР-СКД для достижения целей тестовой стадии эксплуатации (обеспечение устойчивого тепло-съемка СКД теплоносителя при номинальных линейных нагрузках) возможно целесообразно проводить с активной зоной из обогащенного урана.

Таким образом, наряду с базовым вариантом рассматриваются еще три варианта:

1. Со слабоположительным пустотным эффектом реактивности (интегральный ПЭР не превышает 1 \$, что исключает возможность разгона реактора на мгновенных нейтронах). Этот эффект достигается путем замены трех рядов сборок стального отражателя на сборки боковой зоны воспроизводства.

2. С отрицательным пустотным эффектом реактивности. Этот эффект достигается путем замены трех рядов сборок стального отражателя на сборки боковой зоны воспроизводства, а также заменой изотопного состава

штатного топлива на состав с меньшим содержанием четных изотопов плутония. Примерами таких составов может являться плутоний, планируемый в качестве штатного топлива реактора МБИР (содержание плутония-239 порядка 90 %), плутоний, использующийся в настоящее время в качестве топлива реактора БН-800 [12,13] (содержание плутония-239 порядка 80 %).

3. С отрицательным пустотным эффектом, который достигается при использовании в качестве штатного топлива обогащенного урана.

Для каждого из рассмотренных вариантов (базового, а также с измененным составом отражателя с использованием высокофонового и низкофоновое плутония в топливе активной зоны и с урановой активной зоной) проведен подбор содержания плутония с использованием трехзонного выравнивания поля энерговыделения.

Поскольку при изменении состава отражателя, а также изменении изотопного состава плутония изменяется поле энерговыделения, а также темп падения реактивности, то производился подбор доли плутония из критерия обеспечения $K_{эфф}=1$ на конец микрокампании. Результаты представлены в таблице 4 и на рисунке 3.

Таблица 4. Различные варианты активной зоны МТИР-СКД

Table 4. Different variants of the MTIR-SCD core

Параметр	Базовый вариант	Использование БЗВ	Использование БЗВ + Pu МБИР	Использование БЗВ + Pu БН-800	Урановая активная зона
ПЭР на начало МКК, \$	1,7	0,06	– 5,9	– 2,0	-6,3
ПЭР на конец МКК, \$	2,2	0,2	– 5,8	– 1,7	-6,4
Содержание плутония по зонам, %	22/27/35	22/27/36	17/20/27	18,5/23/30,5	23,5/29/37,5
Содержание гадолиния, %	0,5	0,3	0,3	0,3	2,8
Темп падения реактивности за МКК, %	0,94	0,75	0,87	0,82	0,60
Доля запаздывающих нейтронов, %	0,35	0,37	0,34	0,33	0,71

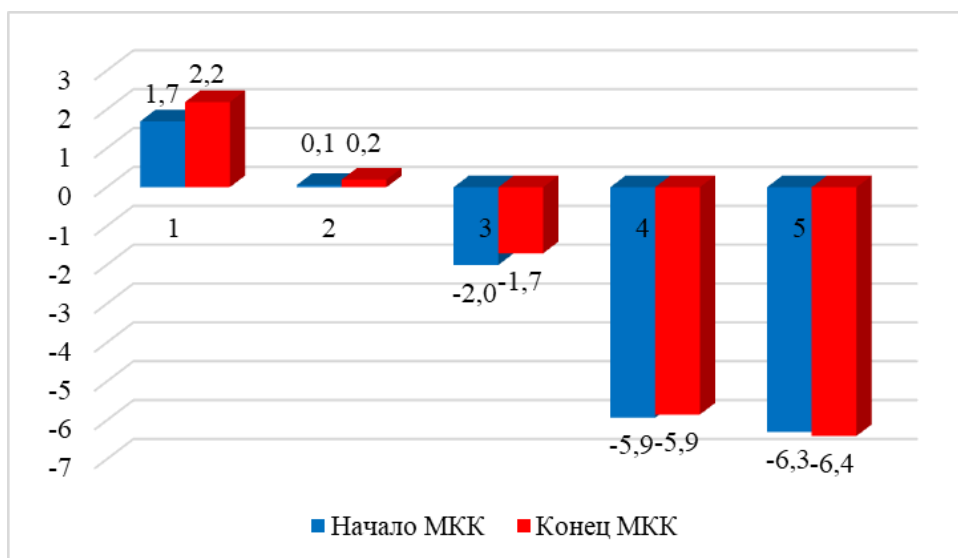


Рисунок 3. Пустотный эффект реактивности в различных вариантах МТИР-СКД (1 – использование плутония ОЯТ ВВЭР-1000 (базовый вариант), 2 – использование плутония ОЯТ ВВЭР-1000 и урановой боковой зоны воспроизводства, 3 – использование плутония БН и урановой боковой зоны воспроизводства, 4 – использование плутония МБИР и урановой боковой зоны воспроизводства, 5 – использование уранового топлива в активной зоне)

Figure 3. Void reactivity effect in different MTIR-SCD variants (1 - use of VVER-1000 SNF plutonium (basic variant), 2 - use of VVER-1000 SNF plutonium and uranium side reproduction zone, 3 - use of BN plutonium and uranium side reproduction zone, 4 - use of MBIR plutonium and uranium side reproduction zone, 5 - use of uranium fuel in the core)

Для всех рассмотренных вариантов проводилась компенсация положительного плотностного эффекта реактивности путем добавления в топливо гомогенно резонансного поглотителя – оксида гадолиния. Однако, если для плутониевых вариантов активной зоны содержание гадолиния не превышает 0,5 %, то для урановой активной зоны требуется введение 3 % поглотителя.

Необходимо отметить, что полученное значение отрицательного пустотного эффекта реактивности является фактически предельно возможным значением. При необходимости возможно увеличение пустотного эффекта реактивности до необходимого отрицательного уровня путем изменением требований к изотопному составу плутония в топливе.

Заключение

Проблема положительного пустотного эффекта важна для реакторов, работающих в быстром спектре нейтронов с уран-плутониевым топливом. Наряду с реактором БН данная проблема актуальна и для реактора ВВЭР-СКД, поэтому перед началом его проектирования и сооружения необходимо расчетно-экспериментально обосновать без-

опасность такого реактора с положительным ПЭР.

Для этого предлагается использовать реактор МТИР-СКД, который позволяет без изменения конструкции реактора, а лишь изменением состава топлива и отражателя получать ПЭР различного знака. На начальном этапе работы в МТИР-СКД должен реализовываться отрицательный ПЭР, чтобы консервативно обеспечить безопасность реактора в случае запроектной аварии с полным опустошением. После этого возможно изменение состава топлива и смена знака ПЭР на положительный, что позволит экспериментально обосновать безопасность реактора СКД с положительным ПЭР и валидировать программные средства для расчета запроектных аварий.

В первой части исследования проведены расчеты балансов нейтронов с целью объяснить основные механизмы реализации пустотного эффекта реактивности в базовом варианте. Получено, что существенное влияние в положительную компоненту ПЭР оказывает стальной отражатель, а также изотоп плутония-240.

С учетом полученных результатов при оценке балансов нейтронов предлагается

возможность достижения как отрицательно-го ПЭР, так и нулевого. При использовании боковой зоны воспроизводства вместо стального отражателя, а также топлива с низкофоновым плутонием достигается отрицательный пустотный эффект реактивности. Замена плутония на высокофоновый позволяет достичь положительного пустотного эффекта реактивности, но не превыша-

ющего 1\$, что исключает возможность возникновения неуправляемого разгона на мгновенных нейтронах, а в случае замены зоны воспроизводства на стальной отражатель ПЭР достигает положительного значения сравнимого по величине с ПЭР в ВВЭР-СКД. Это позволит обосновать безопасную эксплуатацию ВВЭР-СКД с положительным пустотным эффектом.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Уолтер А., Рейнольдс А. Реакторы-размножители на быстрых нейтронах. Перевод с англ. А.А. Ванькова, В.В. Яровицина. Москва: Энергоатомиздат, 1986. 624 с. Режим доступа: https://elbib.biblioatom.ru/text/uolter_reaktory-razmnozhiteli_1986/p3/ (дата обращения: 21.01.2025).
Waltar A., Reynolds A. Fast breeder reactors. Pergamon Press, 1981. 853 p. Available at: https://openlibrary.org/books/OL4110436M/Fast_Breeder_Reactors (accessed: 21.01.2025).
2. Ашурко Ю.М., Андреева К.А., Бурьевский И.В., Волков А.В. [и др.]. Исследование влияния натриевого пустотного эффекта реактивности на безопасность быстрого натриевого реактора большой мощности. *Известия высших учебных заведений. Ядерная энергетика*. 2014;3:5–14. <https://doi.org/10.26583/npe.2014.3.01>
Ashurko Yu.M., Andreeva K.A., Bur'evskij I.V., Volkov A.V. [et al.]. Investigation of the SVRE influence on the safety of large size sodium fast reactor. *Izvestiya vuzov. Yadernaya Energetika*. 2014;3:5–14. (in Russ.). <https://doi.org/10.26583/npe.2014.3.01>
3. Поплавский В.М., Матвеев В.И., Елисеев В.А., Кузнецов И.А. [и др.]. Исследование влияния натриевого пустотного эффекта реактивности на технико-экономические характеристики и безопасность перспективного быстрого реактора. *Атомная энергия*. 2010;108(4):230–235. Режим доступа: <https://j-atomicenergy.ru/index.php/ac/article/view/1460/1441> (дата обращения: 24.01.2024).
Poplavskii, V.M., Matveev, V.I., Eliseev, V.A., Kuznetsov I.A. [et al.]. Investigation of the influence of the sodium void effect of reactivity on the technical-economic performance and safety of an advanced fast reactor. *Atomic energy*. 2010;108:289–295. (in Russ.). <https://doi.org/10.1007/s10512-010-9291-2>
4. Арутюнян А.К., Выговский С.Б., Хачатрян А.Г. Исследование способов повышения КВ в быстрых реакторах с МОХ-топливом при стремлении к минимальным значениям НПЭР. Безопасность ядерной энергетики: тезисы XV Научно-практической конференции, 6–8 июня 2019 г. НИЯУ МИФИ [и др.]. Волгоград: ВИТИ НИЯУ МИФИ, 2019. С. 68–71. Режим доступа: https://nps.viti-mephi.ru/files/page/file/sbornik_tezisov_byae-2019_0.pdf (дата обращения: 24.01.2025).
Harutyunyan A.K., Vygovskiy S.B., Khachatryan A.G. Study ways to increase KV in fast reactors with MOX-fuel aiming for the minimum SVRE. Nuclear energy safety: Abstracts of the XV Scientific and practical conference, June 6 – 8, 2019. NRNU MEPhI [et al.]. Volgograd: VETI NRNU MEPhI, 2019. C. 68–71. (in Russ.). Available at: https://nps.viti-mephi.ru/files/page/file/sbornik_tezisov_byae-2019_0.pdf (accessed: 24.01.2025).
5. Ашурко Ю.М., Андреев К.А., Бурьевский И.В., Волков А.В. [и др.]. Исследование влияния натриевого пустотного эффекта реактивности на безопасность быстрого натриевого реактора большой мощности. *Известия высших учебных заведений. Ядерная энергетика*. 2014;3:5–14. Режим доступа: <https://static.nuclear-power-engineering.ru/articles/2014/03/01.pdf> (дата обращения: 24.01.2025).
Ashurko Y.M., Andreev K.A., Buryevsky I.V., Volkov A.V. [et al.]. Investigation of sodium void reactivity effect on safety of high power fast sodium Reactor. *Izvestiya vysshee obrazovaniya vysshee obrazovaniya. Nuclear power engineering*. 2014;3:5-14. (in Russ.). Available at: <https://static.nuclear-power-engineering.ru/articles/2014/03/01.pdf> (accessed: 24.01.2025).
6. Елисеев В.А., Забудько Л.М., Малышева И.В., Матвеев В.И. Нитридное топливо для перспективного быстрого натриевого реактора типа БН-1200. *Атомная энергия*. 2013;114(5):266–270. Режим доступа: <https://www.j-atomicenergy.ru/index.php/ac/article/view/1128> (дата обращения: 21.01.2025).
Eliseev V.A., Zabudko L.M., Malysheva I.V., Matveev V.I. Nitride fuel for a prospective BN-1200 type fast sodium reactor. *Atomic energy*. 2013;114(5):331–336. (in Russ.). <https://doi.org/10.1007/s10512-013-9720-0>
7. Хаммел Г., Окрент Д. Коэффициенты реактивности в больших энергетических реакторах на быстрых нейтронах. Москва: Атомиздат, 1975. 237 с. Режим доступа: <https://search.rsl.ru/ru/record/01006956830?ysclid=mbavpcsx6v208191008> (дата обращения: 25.01.2025).
Hammel G., Okrent D. Reactivity coefficients in large power fast neutron reactors. American Nuclear Society, 1970. 386 p. Available at: https://openlibrary.org/works/OL6674035W/Reactivity_coefficients_in_large_fast_power_reactors (accessed: 25.01.2025).

8. Lou M. Loss of Coolant Accident Simulation for the Canadian Supercritical Water-Cooled Reactor Using RELAP5/MOD4. Diss. Master of App. Sci. McMaster University, 2016. 143 p. Available at: https://macsphere.mcmaster.ca/bitstream/11375/19137/2/Lou_Mengmeng_2016Apr_MASc.pdf (accessed: 25.01.2025).

9. Алексеев П.Н., Ковалишин А.А., Седов А.А., Андрианова Е.А. [и др.]. Развитие технологии ВВЭР на базе энергетических реакторов с легководным теплоносителем сверхкритических параметров. *Вопросы атомной науки и техники. Серия: Физика ядерных реакторов*. 2023;1:48–63. EDN: EXYEZU. Режим доступа: <http://nrcki.ru/files/pdf/VANT-2023-01.pdf> (дата обращения: 24.01.2025).

Alekseev P.N., Kovalishin A.A., Sedov A.A., Andrianova E.A. [et al.]. Development of VVER technology based on power reactors with light-water coolant of supercritical parameters. *Problems of atomic science and engineering. Series: Physics of nuclear reactors*. 2023;1:48–63. (in Russ.). Available at: <http://nrcki.ru/files/pdf/VANT-2023-01.pdf> (accessed: 24.01.2025).

10. Лапин А.С., Седов А.А., Бландинский В.Ю., Котов Я.А. [и др.]. Обоснование выбора физических характеристик и мощности многоцелевого тестового исследовательского реактора со сверхкритическими параметрами легководного теплоносителя. *Вопросы атомной науки и техники. Серия: Физика ядерных реакторов*. 2024;2:76–88. Режим доступа: <http://nrcki.ru/files/pdf/VANT-2024-02.pdf> (дата обращения: 24.01.2025).

Lapin A.S., Sedov A.A., Blandinsky V.Yu., Kotov Y.A. [et al.]. Justification of selection of physical characteristics and power of multipurpose test research reactor with supercritical parameters of light water coolant. *Problems of atomic science and engineering. Series: Physics of nuclear reactors*. 2024;2:76–88. (in Russ.). Available at: <http://nrcki.ru/files/pdf/VANT-2024-02.pdf> (accessed: 24.01.2025).

11. Лапин А.С., Бландинский В.Ю., Невиница В.А., Пустовалов С.Б., Седов А.А., Субботин С.А., Фомиченко П.А. Нейтронно-физические особенности реактора МТИР-СКД как экспериментальной базы для отработки перспективных легководных реакторных технологий. *Известия вузов. Ядерная энергетика*. 2024;3:18–31. <https://doi.org/10.26583/npe.2024.3.02>

Lapin A.S., Blandinsky V.Y., Nevinitza V.A., Pustovalov S.B., Sedov A.A., Subbotin S.A., Fomichenko P.A. Neutronic peculiarities of the MTIR-SKD reactor as an experimental base for testing advanced light-water reactor technologies. *Izvestiya vuzov. Yadernaya Energetika*. 2024;3:18–31. (in Russ.). <https://doi.org/10.26583/npe.2024.3.02>

12. Клинов Д.А., Семенов М.Ю., Михайлов Г.М., Перегудов А.А. [и др.]. Расчетно-экспериментальный анализ нейтронно-физических характеристик БН-800 в период перехода на загрузку смешанным оксидным уран-плутониевым топливом. *Атомная энергия*. 2023;135(1–2):3–10. Режим доступа: <https://www.j-atomicenergy.ru/index.php/ae/article/view/5314> (дата обращения: 21.01.2025).

Klinov D.A., Semenov M.Y., Mikhailov G.M., Peregudov A.A. [et al.]. Calculation and experimental analysis of BN-800 neutron-physical characteristics during the transition to mixed oxide fuel loading. *Atomic energy*. 2023;135:1–11. <https://doi.org/10.1007/s10512-024-01074-y>

13. Клинов Д.А., Семенов М.Ю., Михайлов Г.М., Перегудов А.А. [и др.]. Анализ точности расчета распределения энергии в БН-800. *Вопросы атомной науки и техники. Серия: Ядерно-реакторные константы*. 2024;1:65–71. Режим доступа: <https://vant.ippe.ru/year2024/1/neutron-constants/2445-2.html> (дата обращения: 21.01.2025).

Klinov D.A., Semenov M.Yu., Mikhailov G.M., Peregudov A.A. [et al.]. Analysis of the accuracy of calculating the distribution of energy in BN-800. *Problems of atomic science and engineering. Series: Nuclear and reactor constants*. 2024;1:65–71. Available at: <https://vant.ippe.ru/year2024/1/neutron-constants/2445-2.html> (accessed: 21.01.2025).

ВКЛАД АВТОРОВ:

Лапин А.С. – проведение численных расчетов, подготовка текста статьи;
Волков Ю.Н. – выбор методов исследования;
Субботин С.А. – постановка задачи, выбор методов исследования.

ИСТОЧНИКИ ФИНАНСИРОВАНИЯ:

Работа выполнена без внешних источников финансирования.

БЛАГОДАРНОСТИ:

Авторы выражают благодарность коллегам из Курчатовского комплекса перспективной атомной энергетики НИЦ «Курчатовский институт» – Невинице В.А., Бландинскому В.Ю., Седову А.А., Фомиченко П.А., Пустовалову С.Б. за помощь в постановке задачи и обсуждении результатов исследования.

AUTHORS' CONTRIBUTION:

Polozkov S.D. – numerical calculations, preparation of the text of the article;
Volkov Yu.N. – the choice of research methods;
Subbotin S.A. – problem statement, choice of research methods.

FUNDING:

The authors state that there are no sources of funding.

ACKNOWLEDGEMENTS:

The authors would like to express their gratitude to their colleagues from the Kurchatov Complex of Advanced Nuclear Power Engineering of the Kurchatov Institute Research Center – Nevinitza V.A., Blandinsky V.Yu., Sedov A.A., Fomichenko P.A., Pustovalov S.B. for their help in setting the problem and discussing the study results.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ:

Конфликта интересов нет.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ:

Антон Сергеевич Лапин, аспирант НИЯУ МИФИ, г. Москва; Научно-исследовательский центр «Курчатовский институт», г. Москва, Российская Федерация.

<https://orcid.org/0009-0007-9013-4932>

e-mail: Lapin_AS@nrcki.ru

Юрий Николаевич Волков, кандидат технических наук, доцент НИЯУ МИФИ, г. Москва; Научно-исследовательский центр «Курчатовский институт», г. Москва, Российская Федерация.

<https://orcid.org/0000-0002-3954-6639>

e-mail: YNVolkov@mephi.ru

Станислав Анатольевич Субботин, кандидат технических наук, доцент НИЯУ МИФИ, г. Москва; Научно-исследовательский центр «Курчатовский институт», г. Москва, Российская Федерация.

<https://orcid.org/0000-0003-4318-6338>

e-mail: Subbotin_SA@nrcki.ru

CONFLICT OF INTEREST:

No conflict of interest.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS:

Anton S. Lapin, Postgraduate student, NRNU MEPhI, Moscow; Scientific Research Center «Kurchatov Institute», Moscow, Russian Federation.

<https://orcid.org/0009-0007-9013-4932>

e-mail: Lapin_AS@nrcki.ru

Yury N. Volkov, Cand. Sci. (Engin.), Associate Professor, NRNU MEPhI, Moscow; Scientific Research Center «Kurchatov Institute», Moscow, Russian Federation.

<https://orcid.org/0000-0002-3954-6639>

e-mail: YNVolkov@mephi.ru

Stanislav A. Subbotin, Cand. Sci. (Engin.), Associate Professor, NRNU MEPhI, Moscow; Scientific Research Center «Kurchatov Institute», Moscow, Russian Federation.

<https://orcid.org/0000-0003-4318-6338>

e-mail: Subbotin_SA@nrcki.ru

Поступила в редакцию / Received 28.02.2025

После доработки / Revision 30.05.2025

Принята к публикации / Accepted 03.06.2025