

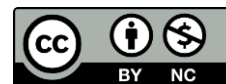
ЭКСПЛУАТАЦИЯ ОБЪЕКТОВ
АТОМНОЙ ОТРАСЛИ
OPERATION OF FACILITIES
NUCLEAR INDUSTRY

<https://doi.org/10.26583/gns-2026-03-07>

УДК 621.039.536

EDN UDNLUF

Оригинальная статья / Original paper



**Применение спектрального регулирования и выгорающих поглотителей
для снижения запаса реактивности в водо-водяном реакторе**

И.Ш. Кускеев , **О.Ю. Кавун** , **В.В. Семишин** , **Е.А. Лебедева** , **Я.Д. Столотнюк** 

Московский государственный технический университет имени Н.Э.Баумана
(национальный исследовательский университет), г. Москва, Российская Федерация

✉ kuskeeviskander@gmail.com

Резюме. Представлен расчетный анализ применения спектрального регулирования и выгорающих поглотителей в водо-водяном реакторе для снижения запаса реактивности, компенсируемой жидкостной системой. Использован нейтронно-физический модуль ПС DESNA-7, предназначенный для трехмерного моделирования активной зоны в двухгрупповом покассетном приближении. Расчет нейтронно-физических сечений проводился в ПС САПФИР-95.1. Рассмотрена модель активной зоны водо-водяного реактора с тепловой мощностью 1600 МВт, набранная из 163 ТВС, из которых в 31 ТВС находятся стержни-вытеснители из оксида природного урана UO_2 . Для частичной компенсации избыточной реактивности применялись твэги с массовым содержанием Gd_2O_3 8 %. Для оценки влияния жесткости спектра на эффективность компенсации избыточной реактивности разработана модель активной зоны с размещением вытеснителей в 61 ТВС. Рассмотрено перемещение вытеснителей в процессе кампании с постоянной скоростью и полным их извлечением на 650 сутки. Ужестчение спектра позволило снизить критическое содержание борной кислоты в течение 550 суток кампании. Увеличение массового содержания Gd_2O_3 в твэгах до 13,5 % позволило снизить концентрацию борной кислоты в начале кампании до 0,3 г/кг. Предложена модель активной зоны, в составе которой используются ТВС с ПЭЛ, перемещаемыми в ручном режиме в течение кампании. Так же предусмотрены ТВС с ПЭЛ, выполняющими функцию аварийной защиты. Массовое содержание Gd_2O_3 в твэгах 13,5 % позволило снизить запас реактивности, компенсируемый рабочими органами СУЗ и системой борного регулирования до 4,37 %. При этом на систему борного регулирования приходится 57,9 % этого запаса. Показано, что для разработанной модели активной зоны концентрация борной кислоты остается равной в среднем 0,3 г/кг в течение всей кампании.

Ключевые слова: спектральное регулирование, ВВЭР-С, модель активной зоны, спектр нейтронов, стержни-вытеснители, жидкостное борное регулирование

Для цитирования: Кускеев И.Ш., Кавун О.Ю., Семишин В.В., Лебедева Е.А., Столотнюк Я.Д. Применение спектрального регулирования и выгорающих поглотителей для снижения запаса реактивности в водо-водяном реакторе. *Глобальная ядерная безопасность*. 2026;16(3):71-81. <https://doi.org/10.26583/gns-2026-03-07>

For citation: Kuskeev I.Sh., Kavun O.Yu., Semishin V.V., Lebedeva E.A., Stolotnyuk Ya.D. The use of spectral control and burnable absorbers to reduce the reactivity reserve in a water-cooled reactor. *Nuclear Safety*. 2026;16(3):71-81. (In Rus). <https://doi.org/10.26583/gns-2026-03-07>

**The use of spectral control and burnable absorbers to reduce the reactivity reserve
in a water-cooled reactor**

Iskander S. Kuskeev , **Oleg Yu. Kavun** , **Viktor V. Semishin** ,
Ekaterina A. Lebedeva , **Yaroslava D. Stolotnyuk** 

Bauman Moscow State Technical University (National Research University), Moscow, Russian Federation

✉ kuskeeviskander@gmail.com

Abstract. The paper presents a computational analysis of the application of spectral regulation together with burnable absorbers in a water-cooled reactor to reduce the reactivity excess to be compensated by the liquid system. The neutron-physical module of the DESNA-7 code, designed for three-dimensional core modeling in a two-group assembly-by-assembly approximation, is used. The calculation of neutron-physical cross-sections is calculated by the SAPFIR-95.1 code. This paper examines a model of the core of a water-cooled reactor with a thermal power of 1,600 MW, comprising 163 fuel assemblies, 31 of them contain displacer rods made of natural uranium oxide UO_2 . Fuel elements contained 8% by weight of Gd_2O_3 are used to partially compensate the excess reactivity. A model of the core with displacers placed in 61 fuel assemblies has been developed to assess the impact of the spectrum hardness on the effectiveness of excess reactivity compensation. The movement of displacers during the campaign is considered, with a constant rate and complete removal at 650 days. The hardening of the spectrum allows to reduce critical content of boric acid during the 550-day campaign. Increasing the mass content of Gd_2O_3 in the fuel elements with gadolinium to 13.5% resulted in a reduction in the concentration of boric acid at the beginning of the campaign to 0.3 g/kg. A model of the core is proposed, which includes fuel assemblies with absorber elements that are moved manually during the campaign. It also includes fuel assemblies with absorber elements fulfilling the emergency protection function. The mass content of Gd_2O_3 in the fuel assemblies 13.5 % allows to reduce the reactivity reserve that can be compensated by the control rods and the boron regulation system to 4.37 %. The boron regulation system accounts for 57.9% of this reserve. It is shown that the concentration of boric acid for developed core model remains equal to an average of 0.3 g/kg throughout the campaign.

Keywords: spectral regulation, VVER-S, core model, neutron spectrum, displacer rods, liquid boron regulation

Введение

Концепция управления реактивностью в проекте ВВЭР-С предполагает использование неподвижных выгорающих поглотителей и органов регулирования системы управления и защиты (ОР СУЗ) в виде стержней-вытеснителей и поглощающих стержней (ПС) СУЗ. Так же сохраняется вторая независимая система – ввода раствора жидкого поглотителя (борной кислоты), которая используется при выходе реактора на мощность и остановке на перегрузку. При работе на мощности борное регулирование не применяется.

В реакторе со спектральным регулированием управление реактивностью осуществляется изменением жесткости спектра нейтронов, что реализуется изменением водо-топливного отношения механическим способом – перемещением стержней-вытеснителей. Положение стержней-вытеснителей влияет на водо-топливное соотношение, то есть определяет долю замедлителя в активной зоне, что позволяет оказывать влияние на энергетический спектр нейтронов [1, 107-108]. Данная особенность дает возможность не только применять стержни-вытеснители в части компенсации реактивности, снижая объем использования борной кислоты, но и увеличивать количество образующегося делящегося плутония в начале

кампании при ужесточенном спектре¹, что повышает эффективность использования топлива.

В настоящий момент, согласно информационной справке А.М. Осипова², в проекте ВВЭР-С требуется дополнительное обоснование возможности реализации уранового топливного цикла без борного регулирования при работе на мощности. Расчетное исследование такой возможности – предмет данной работы. Для решения задачи снижения доли запаса реактивности (вплоть до нуля), компенсируемой жидкостной системой, применяются определенные концепцией средства.

Ряд работ [2-5] посвящены обоснованию методик применения ВП для компенсации запаса реактивности. Эффективным оказался выгорающий поглотитель – гадолиний.

¹ «Росэнергоатом» и «ТИТАН-2» заключили договор о сооружении двух инновационных блоков ВВЭР-С-600 Кольской АЭС-2 // Научно-деловой портал «Атомная энергия 2.0». Новости от 18.03.2026). URL: <https://www.atomic-energy.ru/news/2026/03/18/164412> (дата обращения: 24.03.2026).

² Осипов А.М. Разработка активной зоны РУ ВВЭР-С средней мощности для энергоблоков 1 и 2 Кольской АЭС-2 : [презентация]. Осипов А.М.; Круглый стол заседания Ядерного общества [г. Москва, 14 сентября 2023 г.]. Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт». Дата публикации: 14.09.2023. URL: <https://nsrus.ru/files/ppt/20230915/Osipov.pdf> (дата обращения: 27.03.2026).

В реакторах с водой под давлением гадолиний в виде оксида Gd_2O_3 размещается в ТВЭгах, или в циркониевых оболочках. В статье «Оптимизация компенсации запаса реактивности на выгорание в транспортных реакторах с использованием борных поглотителей» [5] применительно к судовым ядерным реакторам показана целесообразность замены традиционных стержней с гадолинием, выгорающим в первой половине кампании, на безоболочечные борированные стержни.

Вопросы оценки диапазонов спектрального регулирования запаса реактивности с помощью системы вытеснителей из различных материалов рассматривались авторскими коллективами [6,7]. При исследовании применения стержней-вытеснителей из металлического урана в части компенсации избыточной реактивности на выгорание была доказана возможность снижения критической концентрации борной кислоты (относительно активной зоны с жидкостным регулированием реактивности) в течение кампании (рис. 1) [7].

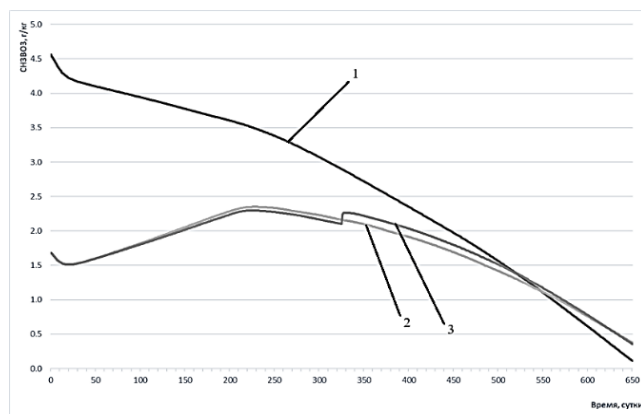


Рисунок 1. Изменение критической концентрации борной кислоты в процессе кампании реактора: 1 – для активной зоны с жидкостным регулированием; 2 – для активной зоны со спектральным регулированием (линейное извлечение подвижных вытеснителей); 3 – для активной зоны со спектральным регулированием (подвижные вытеснители погружены полностью половину топливной кампании, в момент времени 325 суток, полностью извлекаются из активной зоны) [7]

Figure 1. Change in the critical concentration of boric acid during the reactor campaign: 1 – for the liquid-regulated core; 2 – for the spectral-regulated core (linear extraction of the movable displacers); 3 – for the spectral-regulated core (the movable displacers are fully submerged for half of the fuel campaign, and are fully extracted from the core at 325 days) [7]

В качестве исходной для анализа в данной работе рассмотрена активная зона реактора со спектральным регулированием реактивности тепловой мощностью $N_T=1600$ МВт, предложенная в статье авторов, опубликованной ранее [7].

Применяемые программные комплексы и расчетные модели

В данной работе для расчета использовался нейтронно-физический модуль программного средства (ПС) DESNA-7, входящий в программный комплекс РАДУГА-ЭУ [8]

Расчет нейтронно-физических сечений для ПС DESNA-7 производился в ПС САПФИР-95.1³ на основе решения интегрального кинетического уравнения Пайерлса методом вероятностей первых столкновений, с использованием библиотеки микроскопических нейтронных сечений БНАБ-78/С-95 (применяется для расчетов малогрупповых характеристик ячеек водородных и уран-графитовых реакторов для диффузионных программ). Данное программное средство применяется, в том числе, для расчетов ТВС с тесной упаковкой и наличием ТВЭгов и СВП с большим содержанием гадолиния.

Расчетная модель активной зоны (модель 1) реактора в ПС DESNA-7 сформирована из 163 ТВС, геометрические характеристики которых представлены в таблице 1⁴.

³ Программа САПФИР_95.1 с библиотекой констант БНАБ-78/С-95 для нейтронно-физических расчетов ячеек тепловых ядерных реакторов: описание применения. – Москва: Государственная корпорация по атомной энергии «Росатом»; ФГУП «Научно-исследовательский технологический институт им. А. П. Александрова». – 2010. – 90 с. – Режим доступа: https://sapfir.niti.ru/wp-content/uploads/sites/3/2022/06/op_sapfir_95.11.pdf (дата обращения: 10.04.2026).

⁴ Семченков Ю.М., Мохов В.А., Алексеев П.Н. ВВЭР со спектральным регулированием – путь к эффективному использованию урана 238 : [презентация]. Семченков Ю.М.; Международная научно-техническая конференция-2014 [г. Москва, 21–23 мая 2014 г.]. Безопасность, эффективность и экономика атомной энергетики. Дата публикации: 21 мая 2014. Режим доступа: http://www.reamntk.ru/mediafiles/u/files/2014/Plenar/Semchenkov_YU.M..pdf?ysclid=m9q7kqgxz115756351 (дата обращения: 19.02.2025).

Таблица 1. Исходные геометрические данные для ПС САПФИР-95**Table 1.** Initial geometric data for SAPHIRE-95 code

Количество ТВЭлов в ТВС (ТВЭГ), шт	264 (12)
Шаг решетки ТВЭлов, м	0,01164
Шаг решетки ТВС, м	0,236
Размер ТВС под ключ, м	0,234
Диаметр ТВЭла, м	0,0091
Диаметр ТВЭга, м	0,0091
Диаметр вытеснителя, м	0,0086
Диаметр циркониевых стержней, м	0,0080
Толщина оболочек, м	0,00069

Для проведения физического профилирования использовалось топливо с обогащением по U^{235} 2, 2,5, 3 и 4%. Стержни-вытеснители располагаются в 31 ТВС активной зоны (рис. 3, поз. 2). В 132 ТВС (рис. 2, поз. 1) место стержней-вытеснителей и циркониевого каркаса занимает теплоноситель, то есть число ТВЭлов, ТВЭгов и их материальный состав в ТВС, в сравнении с моделью, представленной на рисунке 3, не меняется. Не меняются также геометрические параметры ТВЭлов и ТВЭгов (соответствуют табл. 1).

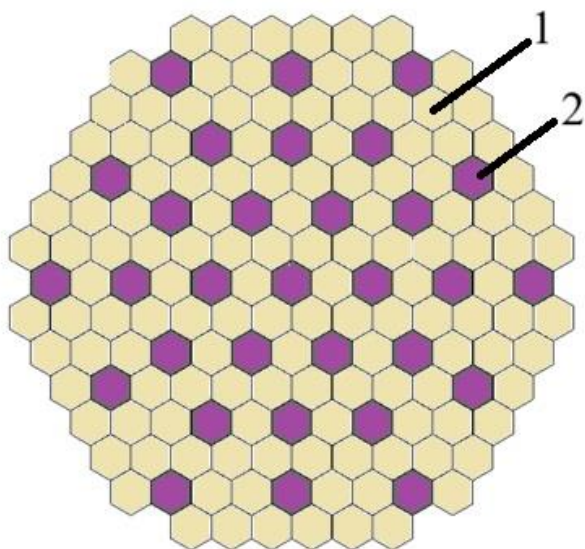


Рисунок 2. Модель активной зоны с применением 31 кассеты с вытеснителями (модель 1):
1 – ТВС без стержней-вытеснителей; 2 – ТВС со стержнями-вытеснителями

Figure 2. Model of the core using 31 cassettes with displacer rods (model 1): 1 – fuel assembly without displacer rods; 2 – fuel assembly with displacer rods

Расчетная модель ТВС (модель 1), реализованная в ПС САПФИР (рис. 3), представляет собой кассету, набранную из 397 ячеек, 252 из которых занимают ТВЭлы, 114 – вытеснители, 12 – ТВЭги и 19 – стержни из сплава циркония, являющиеся каркасом групп стержней-вытеснителей. Теплоноситель – вода, оболочки смоделированных стержневых элементов выполнены из сплава циркония Э110, начальное содержание Gd_2O_3 в ТВЭгах – 8%.

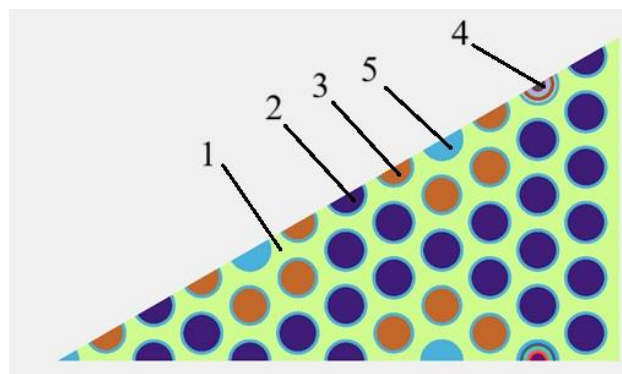


Рисунок 3. Модель ТВС-С, реализованная в ПС САПФИР-95: 1 – теплоноситель (вода); 2 – ТВЭл; 3 – вытеснитель из природного урана; 4 – ТВЭГ; 5 – циркониевый стержень

Figure 3. Model of TVS-S, implemented in SAPHIRE-95: 1 code – coolant (water); 2 – fuel element; 3 – natural uranium displacer; 4 – fuel element with gadolinium; 5 – zirconium rod

Известно, что увеличение весового содержания гадолиния в топливе приводит к уменьшению коэффициента теплопроводности ТВЭга, что при высоких линейных энерговыделениях приводит к растрескиванию и выходу продуктов деления из топлива. Для разрабатываемых в данном исследовании активных зон линейное энерговыделение снижено относительно нагрузки ВВЭР-1000 примерно в 2 раза. Поэтому в работе применялось увеличение массового содержания поглотителя (дискретно) в ТВЭгах до 13,5 %. Значение теплопроводности для содержания гадолиния 13,5% было получено экстраполяцией имеющихся значений для содержания в 8%.

Для оценки влияния количества стержней-вытеснителей на эффективность компенсации избыточной реактивности на выгорание топлива реализована модель

активной зоны (модель 2), в которой изменено только число ТВС со стержнями-вытеснителями с 31 до 61 (рис. 4), геометрические характеристики и материальный состав ТВС при этом не изменялись.

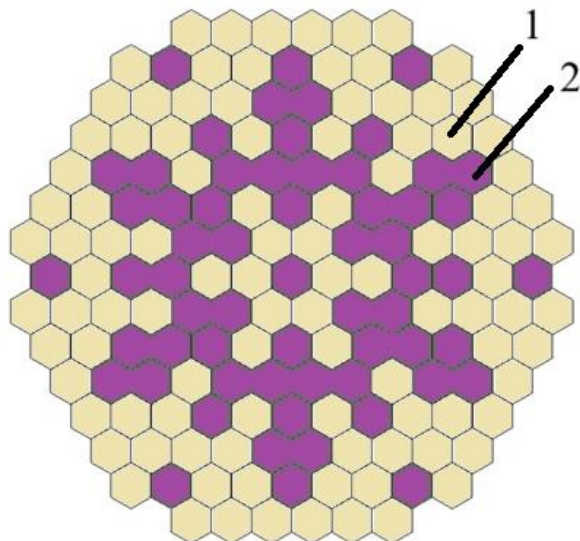


Рисунок 4. Модель активной зоны с применением 61 кассеты с вытеснителями (модель 2): 1 – ТВС без стержней-вытеснителей; 2 – ТВС со стержнями-вытеснителями

Figure 4. Model of the core using 61 cassettes with displacer rods (model 2): 1 – fuel assembly without displacer rods; 2 – fuel assembly with displacer rods

Далее была разработана расчетная модель (модель 3) активной зоны (рис. 5), в структуре которой предусмотрены дополнительные две группы подвижных поглощающих элементов из карбида бора (ПЭЛ), предназначенных для снижения доли запаса реактивности компенсируемой борной кислотой, и для выполнения функции аварийной защиты. ПЭЛ, выполняющие функцию компенсации реактивности (рис. 6), размещаются в 54 ТВС активной зоны, а стержни с функцией аварийной защиты, взведенные в процессе кампании, – в 12 ТВС.

Количество ТВС с размещением в них стержней-вытеснителей сохраняется равным 61. Составы используемых ТВС представлены в таблице 2.

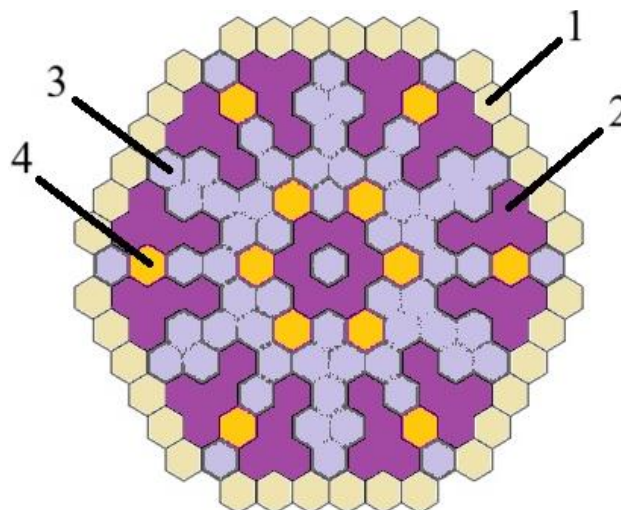


Рисунок 5. Компоновка активной зоны с применением кассет с поглотителем для регулирования и реализации функции АЗ (модель 3): 1 – ТВС без стержней-вытеснителей, без ПЭЛ; 2 – ТВС с ПЭЛ (рис. 6) для компенсации реактивности; 3 – ТВС со стержнями-вытеснителями (рис. 2); 4 – ТВС с ПЭЛ, выполняющими функцию АЗ (рис. 6)

Figure 5. Layout of the core using cassettes with absorber rods for regulation and implementation of the emergency protection function (model 3): 1 – fuel assembly without displacer rods, without absorber elements, 2 – fuel assembly with absorber elements (Fig. 6) for reactivity compensation; 3 – fuel assembly with displacer rods (Fig. 2); 4 – fuel assembly with absorber elements performing the emergency protection function (Fig. 6)

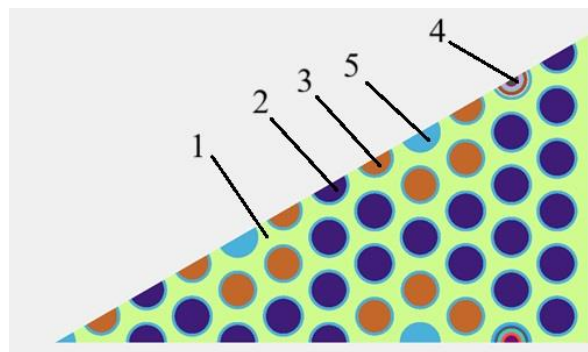


Рисунок 6. Модель ТВС с применением ПЭЛ для компенсации реактивности: 1 – теплоноситель (вода); 2 – твэл; 3 – поглощающий элемент; 4 – твэг; 5 – циркониевый стержень

Figure 6. Model of the fuel assembly using absorber elements for reactivity compensation: 1 – coolant (water); 2 – fuel element; 3 – absorbing element; 4 – fuel element with gadolinium; 5 – zirconium rod

Таблица 2. Основные характеристики состава ТВС**Table 2.** Main characteristics of the fuel assembly composition

Тип ТВС ¹	Количество, шт					
	ТВэлов	Вытеснителей	Циркониевых стержней ²	Подвижных ПЭЛ ³	Подвижных ПЭЛ ⁴	ТВэгов
1	252	0	0	0	0	12
2	252	0	19	114	0	12
4	252	114	19	0	0	12
3	252	0	19	0	114	12

1-Тип ТВС соответствует номеру позиции на рисунке 5;
 2- Циркониевые стержни, формирующие каркас жесткости стержней-вытеснителей или ПЭЛ;
 3-ПЭЛ, компенсирующие реактивность;
 4-ПЭЛ, выполняющие функцию АЗ.

Анализ полученных результатов

При увеличении числа подвижных вытеснителей, происходит большее ужесточение спектра нейтронов из-за относительного уменьшения количества замедлителя в активной зоне. Вследствие ужесточения спектра относительная доля поглощения нейтронов на ядрах гадолиния снижается, потому что его сечение поглощения уменьшается с ростом энергии значительно сильнее $\sigma_a^{Gd} \sim (1/E)^{5/2}$, чем делящийся нуклид

($\sigma_a^{U^{235}} \sim (1/E)^{1/2}$) [ПС САПФИР-95.1], что уменьшает эффективность гадолиния, как поглотителя, в начале кампании. Несмотря на это, одновременное снижается и скорость реакции деления делящегося материала, что позволяет снизить критическое содержание борной кислоты, что особенно заметно в начале кампании, когда все стержни-вытеснители погружены в зону. Результаты расчета приведены на рисунке 7.

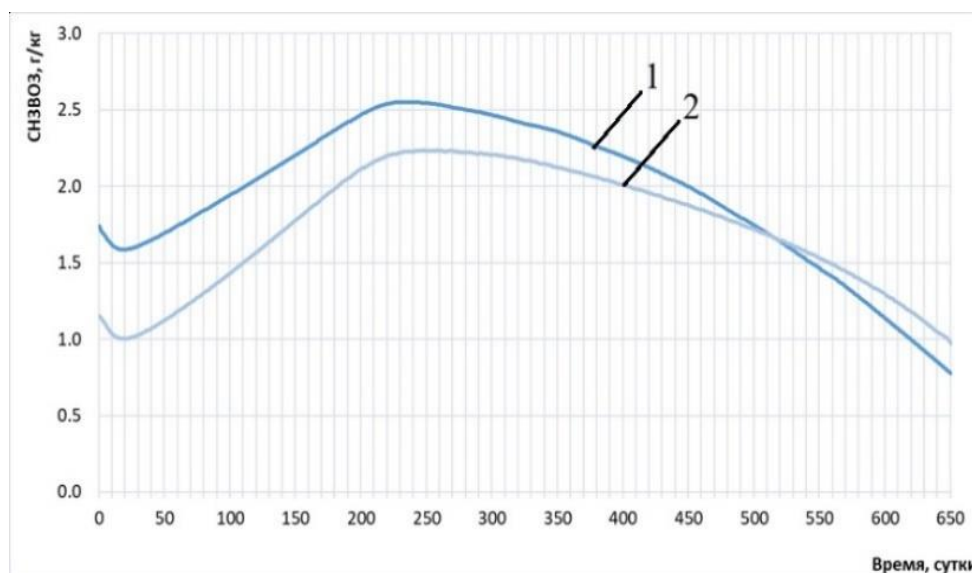


Рисунок 7. Критическое содержание борной кислоты при увеличении числа стержней-вытеснителей в активной зоне: 1 – модель 1, 2 – модель 2

Figure 7. Critical content of boric acid with increasing number of displacer rods in the core: 1 – model 1, 2 – model 2

Так как выгорание ТВЭгов происходит быстрее, чем выгорание топлива, это приводит к постепенному вводу положительной реактивности и достижению её максимума при полном выгорании поглотителя в ТВЭгах

(в рассматриваемой модели к 210 суткам кампании). Эта положительная реактивность компенсируется жидким поглотителем, то есть критическая концентрация борной кислоты в активной зоне увеличивается.

Вес стержней-вытеснителей в модели 1 (см. рис. 2) меньше чем в модели 2 (см. рис. 4), то есть реактивность, вносимая при выводе всех вытеснителей (на время 0 суток в неотравленной зоне) в модели с 31 компенсирующей кассетой, меньше, чем для модели с 61 кассетой (1% и 2,57% соответственно). По этой причине, при применяемом способе вывода вытеснителей с постоянной скоростью и полным их извлечением на 650 сутки, в конце кампании критическая концентрация борной кислоты для модели 2 превосходит значение для модели 1.

Дальнейшее ужесточение спектра нейтронов за счет увеличения количества стержней вытеснителей приводит к снижению скоростей реакций поглощения нейтронов гадо-

линием и топливом, но при этом увеличивается число вторичных нейтронов на акт поглощения в делящемся нуклиде. Поэтому критическую концентрацию борной кислоты снизить не удастся.

По разнице значений концентраций борной кислоты в начале кампании и на 210 сутки видно, что выгорающий поглотитель вносит большой вклад в компенсацию реактивности, поэтому для дальнейшего снижения концентрации жидкого поглотителя использовалось увеличение массового содержания поглотителя в ТВЭгах (рассматривалось содержание 10, 12, 13 и 13,5 %). Расчет кампаний проводился с использованием расчетной модели 2 (см. рис. 4). Результаты расчета кампаний представлены на рисунке 8.

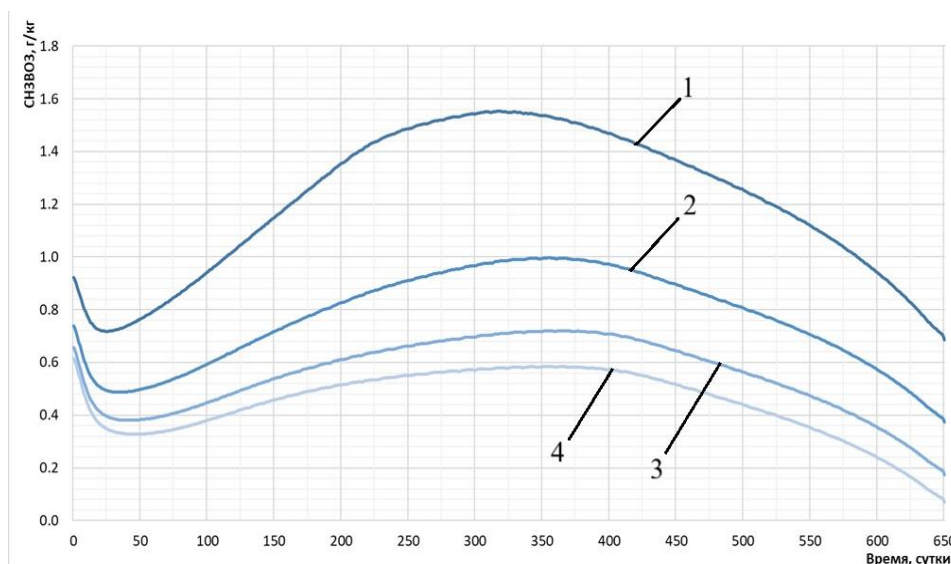


Рисунок 8. Критическое содержание борной кислоты при увеличенном содержании Gd_2O_3 в ТВЭгах; 1 – модель 2 (содержание в ТВЭгах Gd_2O_3 – 10%); 2 – модель 2 (содержание в ТВЭгах Gd_2O_3 – 12%); 3 – модель 2 (содержание в ТВЭгах Gd_2O_3 – 13%); 4 – модель 2 (содержание в ТВЭгах Gd_2O_3 – 13,5%)

Figure 8. Critical content of boric acid at increased enrichment of Gd_2O_3 in fuel elements with gadolinium; 1 – model 2 (content in elements with gadolinium Gd_2O_3 – 10%); 2 – model 2 (content in elements with gadolinium Gd_2O_3 – 12%); 3 – model 2 (content in elements with gadolinium Gd_2O_3 – 13%); 4 – model 2 (content in elements with gadolinium Gd_2O_3 – 13.5%)

Из графиков на рисунке 8 видно, что содержание жидкого поглотителя снижается до около нулевых значений в начале кампании, причем при увеличении содержания Gd_2O_3 в ТВЭгах даже до 10% по поглотителю максимальная концентрация борной кислоты не превышает минимальное значение, полученное для модели 1 при 8% содержанием поглотителя в ТВЭгах (см. рис. 5). Однако выбеги реактивности в начале кампании при выгорании твердого поглотителя при ужест-

оченном спектре нейтронов имеют место и требуют увеличения концентрации борной кислоты.

Так же нужно отметить, что выгорание нуклидов Gd^{155} и Gd^{157} достигается благодаря их высокому сечению поглощения 60,9 и 254 кб соответственно. Но с увеличением массы гадолиния, загружаемого для компенсации большего запаса реактивности, становится значимым поглощение нейтронов его четными изотопами, находящимися

в природной смеси и образующимися при выгорании. Поэтому дальнейшее увеличение содержания поглотителя в твэгах не эффективно. Это привело к необходимости использовать гадолиниевый выгорающий поглотитель в сочетании с подвижной группой ПЭЛ.

Результаты расчета кампании с применением дополнительных подвижных твердых

поглотителей (модель 3) представлены на рисунке 9, где для сравнения приведены графики изменения концентрации борной кислоты полученные для моделей активной зоны 1 и 2. Видно, что для разработанной модели активной зоны концентрация борной кислоты остается равной примерно 0,3 г/кг в течение всей кампании.

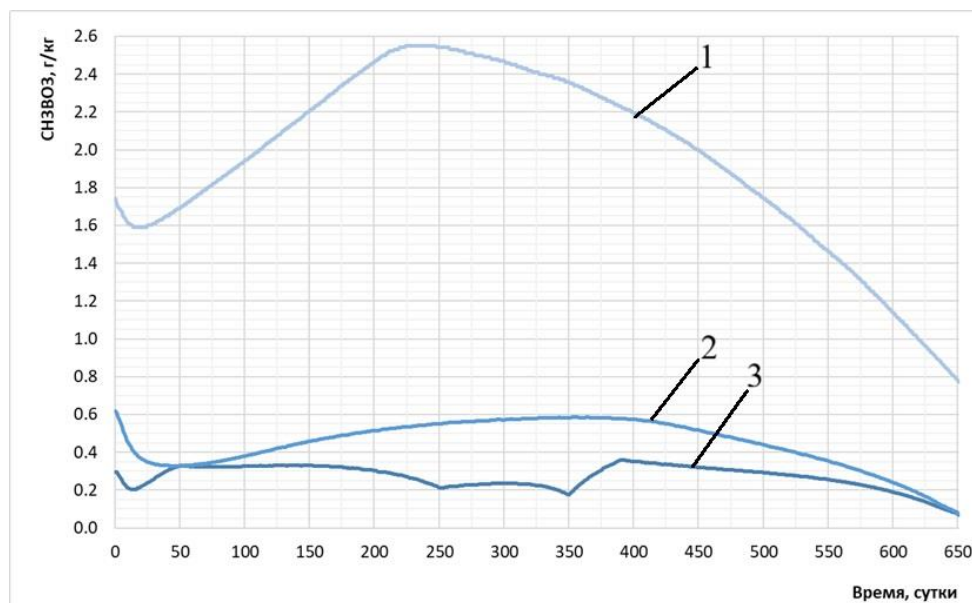


Рисунок 9. Критическая концентрация борной кислоты: 1 – модель 1; 2 – модель 2 (содержание в твэгах Gd_2O_3 - 13,5%); 3 – модель 3 (содержание в твэгах Gd_2O_3 - 13,5%)

Figure 9. Critical concentration of boric acid: 1 – model 1; 2 – model 2 (content in elements with gadolinium Gd_2O_3 -13.5%); 3 – model 3 (content in elements with gadolinium Gd_2O_3 -13.5%)

Минимальные, максимальные и средние значения концентрации борной кислоты за кампанию приведены в таблице 3.

Таблица 3 Расчетные значения критической концентрации борной кислоты в течение кампании
Table 3 Estimated values of the critical concentration of boric acid per campaign

Модель активной зоны	Концентрация борной кислоты, г/кг		
	Минимальное	Среднее	Максимальное
1	0,774	1,955	2,555
2	0,069	0,450	0,616
3	0,066	0,271	0,360

Средняя глубина выгорания на конец топливной кампании составила 15,9 МВт*сут/кг_{т.а.}, максимальная глубина выгорания 19,3 МВт*сут/кг_{т.а.}

Перемещение ПЭЛ в активной зоне реализовано в режиме ручного регулирования

с учетом различных скоростей выгорания гадолиния в твэгах и топлива. Колебания значений концентрации, видимые на графике 3 рисунка 10, обусловлены ограниченной точностью использованного способа регулирования реактивности.

Запас реактивности для модели 1 компенсируемый органами регулирования СУЗ и борной кислотой составляла 8,48 %. Увеличение массового содержания Gd_2O_3 в твэгах позволило снизить запас реактивности, компенсируемый рабочими органами СУЗ и системой борного регулирования до 4,37 %. При этом на систему борного регулирования приходится 57,9 % этого запаса.

Расчетная эффективность органов регулирования, выполняющих функцию АЗ реактора ВВЭР составляет 13.08% [7], для реактора со спектральным регулированием с предложенным расположением ОР – 20%.

На рисунке 10 представлена оценка в процессе кампании аксиального офсета (АО), определяемого как процентное отношение разницы энерговыделения в верхней и нижней половинах активной зоны к общему энерговыделению, формула (1):

$$AO = \frac{W_B - W_H}{W_B + W_H} \cdot 100\%, \quad (1)$$

где W_B – энерговыделение в верхней половине активной зоны;

W_H – энерговыделение в нижней половине активной зоны.

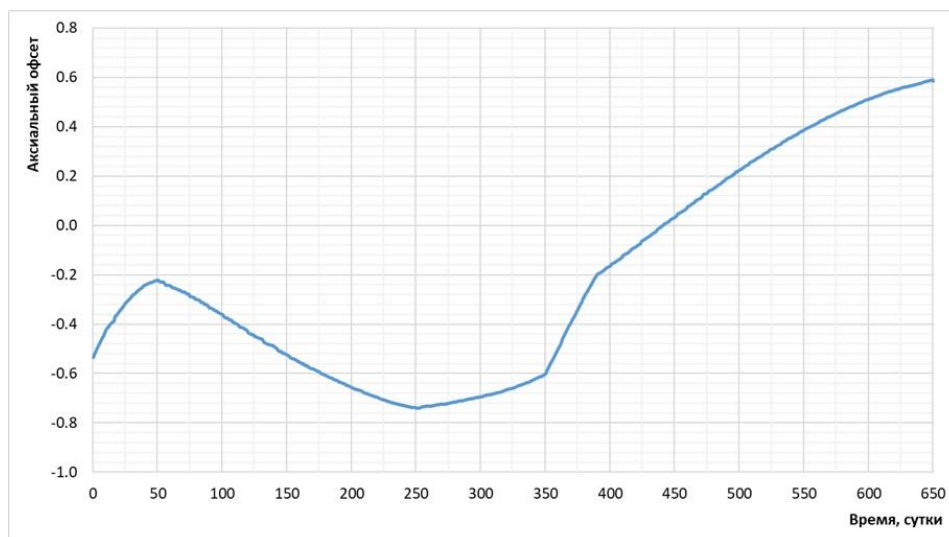


Рисунок 10. Изменение аксиального офсета в процессе кампании
Figure 10. Change in axial offset during the campaign

Видно, что применение стержней-вытеснителей и регулирующей группы поглотителей приводит к неравномерности выгорания топлива по высоте, что будет вызывать переменные тепловые и механические нагрузки на материалы активной зоны. Для решения данной проблемы при проектировании зоны реактора необходимо также предусмотреть группу ОР, которая будет воздействовать на выгорание топлива в аксиальном направлении, компенсируя влияние вытеснителей и ПЭЛ. Удержание значения офсета в определенном диапазоне значений возможно с помощью ОР СУЗ [9].

Заключение

Предложена модель активной зоны водородного реактора с тепловой мощностью 1600 МВт. Рассмотрена первая топливная загрузка с кампанией 650 эффективных суток. Для компенсации избыточной реактивности на выгорание топлива при работе на мощности использованы выгорающие поглотители (ТВЭГ с массовым содержанием Gd_2O_3 13,5 %) и органы регулирования СУЗ в виде стержней-вытеснителей и ПЭЛ из

карбида бора. При этом полностью отказаться от использования системы борного регулирования не удалось.

Массовое содержание Gd_2O_3 в ТВЭГАх 13,5 % позволило снизить запас реактивности, компенсируемый рабочими органами СУЗ и системой борного регулирования до 4,37 %. При этом на систему борного регулирования приходится 57,9 % этого запаса. Показано, что для разработанной модели активной зоны концентрация борной кислоты остается в среднем 0,3 г/кг в течение всей кампании. Компонировка, представленная в статье, обеспечивающая минимальную концентрацию борной кислоты в течение кампании, не является единственно возможной, а служит лишь доказательством того, что принятое в работе решение позволяет достичь требуемого результата. При дальнейшей проработке вопросов, связанных с работой автоматики управления движением групп ОР СУЗ (как вытеснителей, так и поглотителей), возможно некоторое ее упрощение.

Алгоритм перемещения группы ПЭЛ СУЗ в ручном режиме определялся с учетом

изменения эффективности выгорающих поглотителей и выгорания топлива. Не высокая точность использованного метода определяет необходимость применения автоматического режима управления реактивностью.

Неравномерность энерговыделения по высоте ОР может быть скомпенсирована высотным профилированием зоны и применением группы ОР СУЗ, регулирующей аксиальный офсет.

При снижении начальных загрузок топлива для кампаний меньшей длительности (18 или 12 месяцев) полный отказ от компенсации реактивности на выгорание топлива жидкостной системой может быть реализован с использованием неподвижных выгорающих поглотителей и органов регулирования системы управления и защиты (ОР СУЗ) в виде стержней-вытеснителей и поглощающих стержней (ПС) СУЗ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. АО ОКБ «ГИДРОПРЕСС» 75 лет / А.К. Подшибякин, С.Р. Сорокин, С.О. Титова и др.; гл. ред. В.А. Пиминов. – Подольск: ОАО «ПФОП», 2021. 308 с. Режим доступа: https://elib.biblioatom.ru/text/okb-gidropress-75-let_2021/p107/ (дата обращения: 24.03.2026)
2. АО ОКБ «ГИДРОПРЕСС» 75 лет / А.К. Podshibyakin, S.R. Sorokin, S.O. Titova [et al.]; head. ed. V.A. Piminov. – Podolsk: OJSC PFOP, 2021. 308 p. Available at: https://elib.biblioatom.ru/text/okb-gidropress-75-let_2021/p107/ (accessed: 24.03.2026).
3. Музафаров А.Р., Савандер В.И. Использование выгорающих поглотителей в реакторах типа ВВЭР для снижения доли запаса реактивности, компенсируемого жидкостной системой при удлинённых кампаниях. *Глобальная ядерная безопасность*. 2022;(2):42-55. <https://doi.org/10.26583/gns-2022-02-05>
4. Muzafarov A.R., Savander V.I. The Use of Burnable Poisons in VVER-type Reactors to Reduce the Fraction of the Reactivity Margin Compensated by the Liquid System During Extended Runs. *Global nuclear safety*. 2022;(2):42-55. (In Russ.). <https://doi.org/10.26583/gns-2022-02-05>
5. Жихарева Н.С., Коноплёв К.А., Онегин М.С. Использование выгорающих поглотителей в реакторе ПИК для увеличения кампаний. *Атомная энергия*. 2021;131(5):248-253. Режим доступа: <https://www.j-atomicenergy.ru/index.php/ae/article/view/4808/5103> (дата обращения 31.03.2026).
6. Zhihareva N.S., Konoplev K.A., Onegin M.S. Use of Burnable Absorbers in the PIK Reactor to Increase the Run Time. *Atomic energy*. 2022;131(5):249-254. <https://doi.org/10.1007/s10512-022-00874-4>
7. Кириллов К.В., Ахметова П.В., Семишин В.В., Столотнюк Я.Д. Расчетное моделирование выгорающих поглотителей на основе бенчмарка уранового и смешанного уран-плутониевого топлива ВВЭР-1000. *Глобальная ядерная безопасность*. 2025;15(4):48-57. EDN: DWJEEE. <https://doi.org/10.26583/gns-2025-04-05>
8. Kirillov K.V., Akhmetova P.V., Semishin V.V., Stolotnyuk Ya.D. Computational modeling of burnable absorbers based on the benchmark of uranium and mixed uranium-plutonium VVER-1000 fuel. *Global nuclear safety*. 2025;15(4):48-57. (In Russ.). EDN: DWJEEE. <https://doi.org/10.26583/gns-2025-04-05>
9. Самойлов О.Б., Алексеев В.И., Галицких В.Ю. Оптимизация компенсации запаса реактивности на выгорание в транспортных реакторах с использованием борных поглотителей. *Атомная энергия*. 2014;116(1):53-55. Режим доступа: <https://www.j-atomicenergy.ru/index.php/ae/article/view/1270/1251> (дата обращения 31.03.2026).
10. Samoilov O.B., Alekseev V.I., Galitskikh V.Y. Compensation Optimization of Burnup Reactivity Excess by Boron Absorbers in Propulsion Reactors. *Atomic Energy*. 2014;116(1):72-75. <https://doi.org/10.1007/s10512-014-9819-y>
11. Элазака А.И., Савандер В.И., Тихомиров Г.В. Сравнительная оценка диапазона спектрального регулирования запаса реактивности в реакторах с водой под давлением с помощью циркониевых вытеснителей для уранового и ториевого топливных циклов. *Глобальная ядерная безопасность*. 2021;(2):58-67. <https://doi.org/10.26583/gns-2021-02-06>
12. Elazaka A.I., Savander V.I., Tikhomirov G.V. Comparative Study of Spectral Regulation Range of Excess Reactivity Control in Pressurized Water Reactors Using Zirconium Displacers for Uranium and Thorium Fuel Cycles. *Global nuclear safety*. 2021;(2):58-67. (In Russ.). <https://doi.org/10.26583/gns-2021-02-06>
13. Кускеев И.Ш., Семишин В.В., Лебедева Е.А., Столотнюк Я.Д. Расчетное моделирование нейтронно-физических характеристик активной зоны водо-водяного реактора с изменяемым спектром нейтронов. *Глобальная ядерная безопасность*. 2025;15(2):46-55. EDN: IMZUZY. <https://doi.org/10.26583/gns-2025-02-05>
14. Kuskeev I.Sh., Semishin V.V., Lebedeva E.A., Stolotnyuk Ya.D. Computational modeling of the neutron-physical characteristics of the core of a water-cooled reactor with a variable neutron spectrum. *Global nuclear safety*. 2025;15(2):46-55. (In Russ.). EDN: IMZUZY. <https://doi.org/10.26583/gns-2025-02-05>
15. Кавун О.Ю., Увакин М.А., Безруков Ю.А., Шарый Н.В. О применении метода сеток для нейтроннофизических расчетов. *Вопросы атомной науки и техники. Серия: Физика ядерных реакторов*. 2024;(2):38-47. EDN: SFOYBX. Режим доступа: <https://nrcki.ru/files/pdf/VANT-2024-02.pdf> (дата обращения: 09.04.2026).

Kavun O.Yu., Uvakin M.A., Bezrukov Yu.A., Shary N.V. On the application of the grid method for neutron physics calculations. *Problems of atomic science and engineering. Series: Physics of nuclear reactors*. 2024;(2):38-47. (In Russ.). EDN: SFOYBX. Available at: <https://nrcki.ru/files/pdf/VANT-2024-02.pdf> (accessed: 09.04.2026).

9. Коренной А.А., Титов С.Н., Литус В.А., Неделин О.В. Управление аксиальным распределением поля энерговыделения в активной зоне ВВЭР-1000 при переходных процессах. *Атомная энергия*. 2000;88(4):252-257. Режим доступа: <https://www.j-atomicenergy.ru/index.php/ae/article/view/2999/2945> (дата обращения: 09.04.2025).

Korennoi A.A., Titov S.N., Litus V.A., Nedelin O.V. Control of the axial distribution of the energy-release field in the VVER-1000 core during transient processes. *Atomic Energy*. 2000;88(4):257-262. <https://doi.org/10.1007/BF02673607>

ВКЛАД АВТОРОВ

Кускеев И.Ш. – проведение расчетов и визуализация результатов исследования;

Кавун О.Ю. – выбор программных средств, утверждение методологии исследования;

Семишин В.В. – описание методологии, программное обеспечение исследования, участие в написании статьи;

Лебедева Е.А. – теоретический обзор по теме исследования, редактирование текста статьи;

Столотнюк Я.Д. – написание статьи, взаимодействие с рецензентами, контроль результатов исследования.

ИСТОЧНИКИ ФИНАНСИРОВАНИЯ

Работа выполнена без дополнительных источников финансирования.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Конфликта интересов нет.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ:

Искандер Шамилович Кускеев, кафедра «Ядерные реакторы и установки», МГТУ им. Н.Э. Баумана, г. Москва, Российская Федерация.

<https://orcid.org/0009-0006-2968-6861>

e-mail: kuskeeviskander@gmail.com

Олег Юрьевич Кавун, доктор технических наук, профессор, кафедра «Ядерные реакторы и установки», МГТУ им. Н.Э. Баумана, г. Москва, Российская Федерация.

<https://orcid.org/0009-0007-1798-7816>

e-mail: kavun_oleg@mail.ru

Виктор Вадимович Семишин, старший преподаватель МГТУ им. Н.Э. Баумана, кафедра «Ядерные реакторы и установки», г. Москва, Российская Федерация.

<https://orcid.org/0009-0001-2217-6766>

e-mail: semishin@bmstu.ru

Екатерина Александровна Лебедева, кафедра «Ядерные реакторы и установки», МГТУ им. Н.Э. Баумана, г. Москва, Российская Федерация.

<https://orcid.org/0000-0006-5039-971X>

e-mail: kate-lebedeva-2003@mail.ru

Ярослава Донатовна Столотнюк, кандидат технических наук, доцент, кафедра «Ядерные реакторы и установки», МГТУ им. Н.Э. Баумана, г. Москва, Российская Федерация.

<https://orcid.org/0009-0006-1831-0228>

e-mail: stolotyad@bmstu.ru

AUTHORS' CONTRIBUTION

Kuskeev I.Sh. – carrying out calculations and visualising the study results;

Kavun O.U. – software tools selection, research methodology approval;

Semishin V.V. – methodology description, research software, writing the article;

Lebedeva E.A. – a theoretical review of the research, article editing;

Stolotnyuk Ya.D. – writing the article, interacting with reviewers, monitoring the research results.

FUNDING

No additional funding.

CONFLICT OF INTEREST

No conflict of interest.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS:

Iskander Sh. Kuskeev, Department of Nuclear Reactors and Installations, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation.

<https://orcid.org/0009-0006-2968-6861>

e-mail: kuskeeviskander@gmail.com

Oleg Yu. Kavun, Dr. Sci. (Engin.), Department of Nuclear Reactors and Installations, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation.

<https://orcid.org/0009-0007-1798-7816>

e-mail: kavun_oleg@mail.ru

Viktor V. Semishin, Senior Lecturer, Bauman Moscow State Technical University, Department of Nuclear Reactors and Installations, Moscow, Russian Federation.

<https://orcid.org/0009-0001-2217-6766>

e-mail: semishin@bmstu.ru

Ekaterina A. Lebedeva, Department of Nuclear Reactors and Installations, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation.

<https://orcid.org/0000-0006-5039-971X>

e-mail: kate-lebedeva-2003@mail.ru

Yaroslava D. Stolotnyuk, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Department of Nuclear Reactors and Installations, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation.

<https://orcid.org/0009-0006-1831-0228>

e-mail: stolotyad@bmstu.ru

Поступила в редакцию / Received 28.05.2026

После доработки / Revision 03.08.2026

Принята к публикации / Accepted 06.08.2026