

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-2025-04-05>

УДК 621.039.516

EDN DWJEEE

Оригинальная статья / Original paper



**Расчетное моделирование выгорающих поглотителей на основе бенчмарка уранового и смешанного уран-плутониевого топлива ВВЭР-1000**

**К.В. Кириллов, П.В. Ахметова, В.В. Семишин, Я.Д. Столотнюк**  

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

 stolotnyard@bmstu.ru

**Аннотация.** Представлены результаты расчетного моделирования выгорающих поглотителей в составе ТВС с использованием инженерных программ САПФИР\_95 и САПФИР\_РФ. Разработаны две модели ТВС с урановым и уран-плутониевым топливом с применением уран-гадолиниевого выгорающего поглотителя, реализованного в виде твэга. Проведен анализ сеточной сходимости метода расчета коэффициента размножения нейтронов от глубины выгорания топлива. Выработаны рекомендации по количеству расчетных слоев в твэгах для недозамедленных систем (4÷8 слоев) и систем с жестким спектром (2÷4 слоя). Для оценки отклонения расчетов использовался бенчмарк VVER-1000 LEU and MOX. Расчеты, проведенные в программах САПФИР\_95 и САПФИР\_РФ, имеют результаты близкие, по отношению к данным, полученным в программах MCU, TVS-M, WIMS8A, HELIOS, MULTICELL. Максимальное значение относительного отклонения, отнесенное к среднему значению бенчмарка, при расчетах с использованием программы САПФИР\_95 составило: для ТВС с урановым топливом 0,78 %, для ТВС со смешанным уран-плутониевым топливом 0,9 %. Для программы САПФИР\_РФ значения отклонений равны 1,04 % и 1,41 % соответственно. Показано, что для недозамедленных систем с более жестким энергетическим спектром нейтронов, отсутствует явное снижение коэффициента размножения за счет применения СВП. Сделан вывод о возможном сокращении использования твэгов в сборках со смешанным уран-плутониевым топливом или отказе от них. В результате моделирования были получены зависимости распределения плотности потока нейтронов быстрой и тепловой групп в зависимости от глубины выгорания кассет. Результаты, полученные при расчете в САПФИР\_95 и САПФИР\_РФ, качественно не отличаются.

**Ключевые слова:** ТВС, выгорающие поглотители, коэффициент размножения, бенчмарк, САПФИР\_95, САПФИР\_РФ, отклонения расчета.

**Для цитирования:** 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. <https://doi.org/10.26583/gns-2025-04-05>

**For citation:** Kirillov K.V., Akhmetova P.V., Semishin V.V., Stolotnyuk Y.D. Calculational modeling of burnable absorbers based on the benchmark of uranium and mixed uranium-plutonium VVER-1000 fuel. *Nuclear Safety*. 2025;15(4):48–57. (In Russ.). <https://doi.org/10.26583/gns-2025-04-05>

**Calculational modeling of burnable absorbers based on the benchmark of uranium and mixed uranium-plutonium VVER-1000 fuel**

**Kirill V. Kirillov, Polina V. Akhmetova, Viktor V. Semishin, Yaroslava D. Stolotnyuk**  

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

 stolotnyard@bmstu.ru

**Abstract.** The results of computational modeling of burnable absorbers in fuel assemblies using the SAPHIR\_95 and SAPHIR\_RF engineering programs are presented. Two models of fuel assemblies with uranium and uranium-plutonium fuel have been developed using a uranium-gadolinium burnable absorber implemented in the form of a fuel element. The analysis of the grid convergence of a method for calculating the neutron multiplication coefficient from the depth of fuel burnup is carried out. Recommendations have been developed on the number of calculated layers in fuel rods for non-slow systems (4-8 layers) and systems with a rigid spectrum (2-4 layers). The VVER-1000 LEU and MOX benchmark was used to estimate the calculation error. The calculations performed in the SAPHIR\_95 and SAPHIR\_RF programs have results similar to those obtained in the MCU, TVS-M, WIMS8A, HELIOS, and MULTICELL programs. The maximum value of the relative deviation of the benchmark value referred to the average value in calculations using the SAPFIR\_95 program was: for fuel assemblies with uranium fuel 0.78%, for fuel assemblies with mixed uranium-plutonium fuel 0.9%. For the SAPFIR\_RF program, the errors were 1.04% and 1.41%, respectively. It is shown that for systems with a rigid neutron spectrum, unlike non-slow systems, there is no obvious decrease in the multiplication coefficient due to the use of self-shielded burnable absorber. It is concluded that there may be a reduction in the use of fuel rods in assemblies with mixed uranium-plutonium fuel or their abandonment. As a result of the simulation, the distribution dependences of the neutron flux density of the fast and thermal groups were obtained depending on the depth of the burnout of the cassettes. The results obtained during the calculation in SAPHIR\_95 and SAPHIR\_RF are not qualitatively different.

**Keywords:** fuel assemblies, burnable absorbers, multiplication coefficient, benchmark, SAPHIR\_95, SAPHIR\_RF, calculation error.

## Введение

Назначение выгорающих поглотителей (ВП) в ядерных реакторах заключается в подавлении избыточной реактивности топлива на начале его кампании, увеличении глубины выгорания топлива, уменьшении неравномерности энерговыделения по активной зоне и снижении требований к эффективности подвижных органов СУЗ и других компенсирующих систем [1]. ВП, как правило, постоянно находятся в рабочей области и извлекаются лишь во время перегрузок вместе с ТВС. Впервые в отечественной практике стержни выгорающего поглотителя (СВП) применялись на БВЭР в виде трубок из циркониевого сплава Э110, заполненных сплавом МПА ( $Al+CrB_2$ ) и герметизированных заглушками [2]. Время нахождения борного ВП в активной зоне ограничивалось 1 годом, по истечении которого СВП извлекался [2]. Необходимость дополнительных перегрузочных операций внутри ТВС в течении кампании топлива и ограниченность объема бассейнов выдержки осложняли применение СВП, в связи с чем бор в составе ВП был заменен на гадолиний Gd в форме оксида гадолиния  $Gd_2O_3$ , интегрированного в материал топлива. То есть конструктивно стержень СВП подобен твэлу, поэтому СВП чаще называют тепловыделяющими элементами с добавлением гадолиния (твэгами). В связи

с высокой поглощательной способностью гадолиния данное решение позволило увеличить среднее обогащение урана по ТВС и создать новые поколения ТВС с удлиненной кампанией. Период активного выгорания твэга в топливной сборке также ограничивался 1 годом, но не требовал перегрузочных операций внутри ТВС по причине отсутствия  $(n, \alpha)$ -реакции на ядрах изотопов гадолиния и распускания оболочек твэгов от накопления атомов гелия. Предыдущий состав СВП, содержащий бор, имеет ряд объявленных недостатков.

Учитывая актуальность использования ВП, выполнены работы, посвященные расчетно-теоретическому анализу применения различных ВП [3–7]. В работе [3] моделировались нейтронно-физические характеристики бенчмарка FullCore по программе САПФИР\_95&RC\_БВЭР. Работы [4–7] посвящены исследованию выгорания твэгов в системах с разной жесткостью спектра с анализом их периода выгорания, процесса «просветления» для потоков быстрых и тепловых нейтронов в зависимости от глубины выгорания. Рассматривались вопросы оптимального выбора числа твэгов, способа профилирования и размещения их в ТВС. Расчетный анализ проводился с использованием программного кода Serpent.

Для обеспечения качества проектирования активных зон ядерных реакторов

необходимым этапом является выполнение поверочных расчетов в независимых программных комплексах, использующих различные методики и алгоритмы. В данной работе для проведения расчетов использовались САПФИР\_95 и САПФИР\_РФ. САПФИР\_95 – это программа нейтронно-физического расчета инженерного класса, использующая аналитические методы решения для определения пространственно-энергетического распределения нейтронов в ячейке тепловых ядерных реакторов и получения малогрупповых нейтронных сечений и параметров стационарного отравления для диффузионных программ. Программа САПФИР\_95 работает с библиотекой нейтронных констант БНАБ-78/С95. Программа САПФИР\_РФ является модернизированной версией программы САПФИР\_95. В САПФИР\_РФ обновлена используемая библиотека нейтронных сечений на данных РОСФОНДА [8] и ENDF/B-VII [9].

Целью данной работы является исследование выгорания систем, содержащих выгорающие поглотители, с различным составом топлива (урановое и уран-плутониевое) и различной жесткостью спектра нейтронов с использованием программ САПФИР\_95 и САПФИР\_РФ. Реализованный в данных программах метод ВПС предполагает подготовку малогрупповых констант по областям элементов кассеты, которые определяются как регистрационные зоны. Малогрупповые константы определяются сверткой по выбранным регистрационным зонам и энергиям нейтронов. При этом количество регистрационных зон ВП является предметом выбора. Распределение нейтронного потока в объеме твэга и в прилежащей к нему области замедлителя характеризуется существенным градиентом, и необходимое количество регистрационных зон в этих областях определялось из условия минимизации отклонения расчетов.

Геометрические и материальные параметры рассматриваемых ТВС полностью соответствуют приведенным в бенчмарке VVER-1000 LEU and MOX, опубликованного в 2002 г [10].

Для оценки отклонения расчетов по программным комплексам САПФИР\_95 и САПФИР\_РФ использовался бенчмарк VVER-1000 LEU and MOX.

### Спецификация бенчмарка VVER-1000 LEU and MOX

В бенчмарке описываются ТВС с урановым и смешанным уран-плутониевым топливом. Для обеих моделей геометрия сборки одинакова. Конструкция ТВС представляет собой шестигранную призму, заполненную твэлами (300 шт.), твэгами (12 шт.), 1 центральной трубой и направляющими каналами для поглощающих стержней СУЗ (18 шт.). Оболочки центральной трубы, направляющих каналов, твэгов и твэлов выполнены из сплава Э-110. Внутри центральной трубы и направляющих каналов находится теплоноситель. В модели сборки LEU (low-enriched uranium) в качестве материала топливного элемента используется диоксид урана  $UO_2$  с обогащением по  $U^{235}$  3,7 вес.%. В твэлах модели MOX (mixed oxide fuel) используется смешанное уран-плутониевое топливо из обедненного диоксида урана и диоксида плутония с обогащениями по делящемуся  $Pu$  2.0, 3.0 и 4.2 вес.%. В бенчмарке расчет моделей ТВС проводится по 5 кодам: MCU<sup>1</sup> [11–12], TVS-M<sup>2,3</sup>, WIMS8A<sup>4</sup> [13], HELIOS<sup>3</sup>, MULTICELL [15,16]. Во время выгорания плотность объемного энерговыделения ТВС равнялась  $q_v=108\text{МВт}/\text{м}^3$ . В теплоносителе

<sup>1</sup> Гуревич М.И., Шкаровский Д.А. Расчет переноса нейтронов методом Монте-Карло по программе MCU. Учебное пособие. – Москва : НИЯУ МИФИ, 2012. – 154 с. – Режим доступа: [http://library.mephi.ru/pdfunnel.php?Z21FAMILY=максимова&Z21ID=62665&PATH=book-mephi%2FGurevich\\_Raschet\\_perenosa\\_nejtronov\\_metodom\\_Monte-Karlo\\_2012.pdf](http://library.mephi.ru/pdfunnel.php?Z21FAMILY=максимова&Z21ID=62665&PATH=book-mephi%2FGurevich_Raschet_perenosa_nejtronov_metodom_Monte-Karlo_2012.pdf) (дата обращения: 28.05.2025).

<sup>2</sup> Курченков А.Ю., Большагин С.Н. Программа ТВС-М. Описание алгоритма и инструкция для пользователей. Отчет РНЦ КИ, инв. № 32/1-18-203 от 21.04.2003. – Москва, 2003.

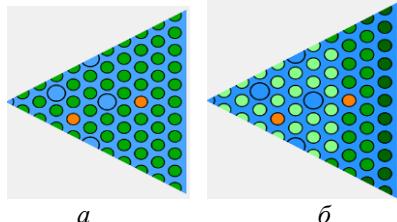
<sup>3</sup> Программа ТВС-М (версия 1.4). Аттестационный паспорт программного средства. Регистрационный номер ПС в ЦЭП № 611 от 31.07.2006. Регистрационный номер паспорта регистрации ПС № 239 от 23.09.2008. Федеральная служба РФ по экологическому, технологическому и атомному надзору. – Москва, 2008.

<sup>4</sup> A modular scheme for neutronics calculations – ANSWERS Software Service WIMS. User guide for version 8: report ANSWERS/WIMS(99)9 – с.1., 1999.

поддерживалась постоянная концентрация борной кислоты 0,6 г/кг.

### Подготовка расчетной модели ТВС для программ САПФИР\_РФ и САПФИР\_95

Разработаны две модели бесчехловых ТВС с урановым (рис. 1 $a$ ) и смешанным уран-плутониевым топливом (рис. 1 $b$ ) с применением уран-гадолиниевого ВП. С целью упрощения расчетов обе модели ограничены 60° сектором симметрии. На рисунке 1 $a$  зеленым цветом обозначено урановое топливо  $UO_2$  с обогащением 3,7% по  $U^{235}$ . На рисунке 1 $b$  светло-зеленым, зеленым, темно-зеленым цветами обозначено уран-плутониевое топливо с обогащением по делящемуся Ru 2.0%, 3.0%, 4.2% соответственно. Другие цветовые обозначения на рисунке 1 $a$  и 1 $b$  идентичны: оранжевый – уран-гадолиниевый ВП с обогащением по  $U^{235}$  3,6 вес.% и 4,0 вес.% по изотопам гадолиния, черный – оболочка из сплава Э-110, голубой – вода с концентрацией борной кислоты 0,6 г/кг.



**Рисунок 1.** Модель ТВС ВВЭР-1000: а) с урановым топливом и уран-гадолиниевым СВП;

б) со смешанным уран-плутониевым топливом и уран-гадолиниевым СВП [составлено авторами]

**Figure 1.** VVER-1000 fuel assembly model: a) with uranium fuel and uranium-gadolinium SBA; б) with mixed uranium-plutonium fuel and uranium-gadolinium BA [compiled by the authors]

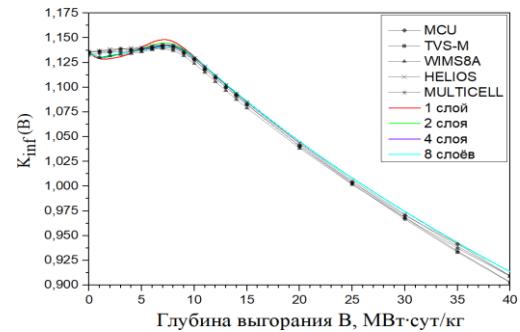
ТВС разбивались на множество регистрационных зон: в каждом ряду начиная от центра кассеты одинаковым типом материала присваивалась своя регистрационная зона, за исключением твэгов. Окружающая твэги вода для всех расчетов была разбита на 20 слоев с присвоением каждому из них своей регистрационной зоны. Для определения числа слоев, достаточного для достоверной картины выгорания, были рассмотрены несколько вариантов разбиения СВП на регистрационные зоны. Каждый твэг в кассете

разбивался последовательно на 1, 2, 4 и 8 регистрационных зон по условию равенства площадей. В каждом из слоев вычислялась плотность потока быстрых и тепловых нейтронов. К тепловой макрогруппе были отнесены нейтроны с энергиями до 0,625 эВ, а к быстрой – от 0,625 эВ до 10,5 МэВ.

### Результаты моделирования и обсуждение Анализ $K_{inf}(B)$ в зависимости от глубины выгорания топлива

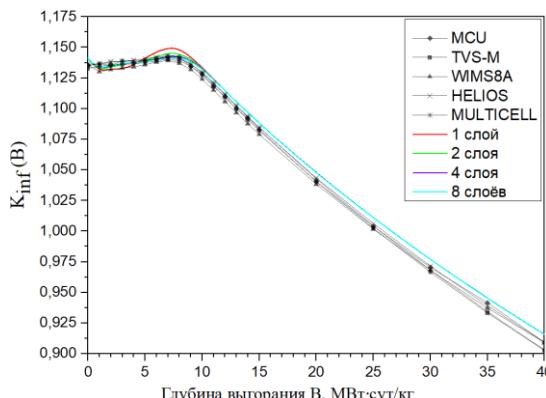
С целью подтверждения корректности сформированных моделей проводилось сопоставление расчетных зависимостей коэффициента размножения  $K_{inf}$  от глубины выгорания топлива  $B$  МВт·сут/кг с результатами бенчмарка. Сравнение результатов расчета исследуемой модели с отчетом бенчмарка представлено на рисунках 2 и 3 для кассеты со слабообогащенным ураном, 4 и 5 для кассеты со смешанным уран-плутониевым топливом [10].

В модели ТВС с урановым топливом величина отклонения результатов расчета  $K_{inf}(B)$  от результатов бенчмарка зависит от выбранного количества регистрационных зон (слоев) (расхождение в результатах уменьшается с увеличением количества зон). Это расхождение наблюдается в течение 203 эф. суток (период активного выгорания СВП) до глубины выгорания 8 МВт·сут/кг. Наибольшее расхождение результата расчета с бенчмарком имеется при значении глубины выгорания топливной сборки  $B = 7$  МВт·сут/кг (рис. 2 и 3).



**Рисунок 2.** Результаты  $K_{inf}(B)$  в зависимости от числа слоев разбиения твэгов для ТВС с урановым топливом и уран-гадолиниевым ВП по САПФИР\_95 [составлено на основе ист. 10]

**Figure 2.**  $K_{inf}(B)$  results depending on the number of fuel element separation layers for fuel assemblies with uranium fuel and uranium-gadolinium BA according to SAPPHIR\_95 [based on 10]



**Рисунок 3.** Результаты  $K_{inf}(B)$  в зависимости от числа слоев разбиения твэгов для ТВС с урановым топливом и уран-гадолиниевым ВП по САПФИР\_РФ [составлено на основе ист. 10]

**Figure 3.**  $K_{inf}(B)$  results depending on the number of fuel element separation layers for fuel assemblies with uranium fuel and uranium-gadolinium BA according to SAPHIR\_RF [based on 10]

Абсолютное отклонение расчета ( $\Delta K_{inf}$ ) (относительно модели с 8 слоями) коэффициента размножения в бесконечной среде для модели с 1 слоем в ПС САПФИР\_95 составила 0,00679. Результаты расчета в ПС САПФИР\_РФ показали большее значение абсолютного отклонения:  $\Delta K_{inf} = 0,00749$ . Относительные отклонения расчетов (абсолютные отклонения, отнесенные к значению  $K_{inf}$  для модели с 8 слоями) для моделей с 1, 2 и 4 слоями при значении выгорания топливной сборки  $B = 7 \text{ MWt}\cdot\text{s/кг}$  представлены в таблице 1.

**Таблица 1.** Относительные отклонения определения  $K_{inf}$  ( $B=7 \text{ MWt}\cdot\text{s/кг}$ ) для ТВС с урановым топливом [составлено авторами]

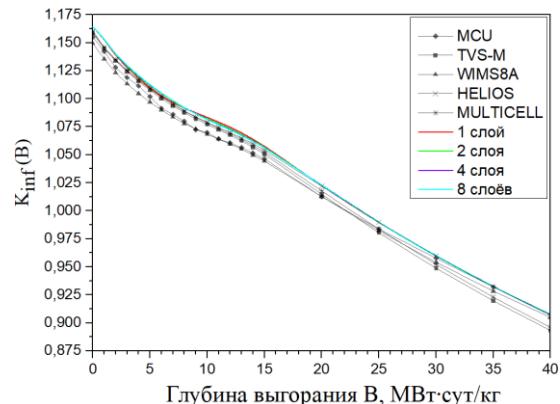
**Table 1.** Relative errors in determining  $K_{inf}$  ( $B=7 \text{ MWt}\cdot\text{s/кг}$ ) for fuel assemblies with uranium fuel [compiled by the authors]

Программа нейтронно-физического расчета	1 слой	2 слоя	4 слоя
ПС САПФИР 95	0,595%	0,302%	0,091%
ПС САПФИР РФ	0,656%	0,294%	0,082%

Модель с разбиением твэга на 4 слоя дает относительную отклонение расчета  $0,082 \div 0,091\%$ , т.е. удовлетворяется критерий сеточной сходимости, значение которого принимается равным статистическому отклонению для прецизионной программы MCU, объявленной в бенчмарке 0,1 % [10].

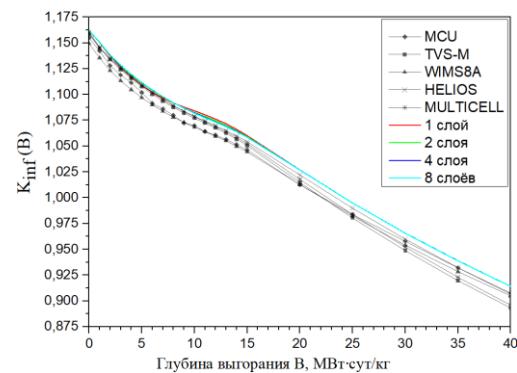
В модели ТВС со смешанным уран-плутониевым топливом активное выгорание

твэга осуществляется до глубины выгорания  $B = 15 \text{ MWt}\cdot\text{s/кг}$  в течение 357 эф. суток. Как видно на графиках рисунков 4 и 5, разбиение твэга на большое число слоев не повышает точность расчета выгорания, как это было в случае использования слабообогащенного уранового топлива.



**Рисунок 4.** Результаты  $K_{inf}(B)$  в зависимости от числа слоев разбиения твэгов для ТВС со смешанным уран-плутониевым топливом и уран-гадолиниевым ВП по САПФИР\_95 [составлено на основе ист. 10]

**Figure 4.**  $K_{inf}(B)$  results depending on the number of fuel element separation layers for fuel assemblies with mixed uranium-plutonium fuel and uranium-gadolinium BA according to SAPHIR\_95 [based on 10]



**Рисунок 5.** Результаты  $K_{inf}(B)$  в зависимости от числа слоев разбиения твэгов для ТВС со смешанным уран-плутониевым топливом и уран-гадолиниевым ВП по САПФИР\_РФ [составлено на основе ист. 10]

**Figure 5.**  $K_{inf}$  results(B) depending on the number of fuel element separation layers for fuel assemblies with mixed uranium-plutonium fuel and uranium-gadolinium BA according to SAPHIR\_RF [based on 10]

Максимальные отклонения  $K_{inf}(B)$  от отчета бенчмарка наблюдаются при глубинах выгорания 5 и 12  $\text{MWt}\cdot\text{s/кг}$ . Относительные отклонения определения  $K_{inf}(5)$  и  $K_{inf}(12)$  представлены в таблицах 2 и 3 соответственно.

**Таблица 2.** Относительные отклонения определения  $K_{inf}$  (5 MW·сум/кг) для ТВС со смешанным уран-плутониевым топливом [составлено авторами]

**Table 2.** Relative errors in determining  $K_{inf}$  (5 MW·day/kg) for fuel assemblies with mixed uranium-plutonium fuel [compiled by the authors]

Программа нейтронно-физического расчета	1 слой	2 слоя	4 слоя
ПС САПФИР 95	0,231%	0,074%	0,014%
ПС САПФИР РФ	0,222%	0,065%	0,010%

**Таблица 3.** Относительные отклонения определения  $K_{inf}$  (12 MW·сум/кг) для ТВС со смешанным уран-плутониевым топливом [составлено авторами]

**Table 3.** Relative errors in determining  $K_{inf}$  (12 MW·day/kg) for fuel assemblies with mixed uranium-plutonium fuel [compiled by the authors]

Программа нейтронно-физического расчета	1 слой	2 слоя	4 слоя
ПС САПФИР 95	0,227%	0,094%	0,030%
ПС САПФИР РФ	0,276%	0,128%	0,020%

Из полученных результатов зависимости  $K_{inf}(B)$  заметно отличие процесса выгорания топливной сборки относительно ТВС с урановым топливом. В ТВС со смешанным уран-плутониевым топливом отсутствует явное снижение коэффициента размножения  $K_{inf}$  в начале кампании. По данным результатам можно заключить, что применение твэлов в топливной сборке с жестким спектром не позволяет обеспечивать эффективное использование ВП. Следовательно, возможно сократить использование твэлов в сборках со смешанным уран-плутониевым топливом или вовсе отказаться от них. Ряд авторов, которые так же анализировали применение ВП в системах с жестким спектром, приходят к тому же выводу [17,18].

### Анализ распределения плотностей потока тепловых и быстрых нейтронов

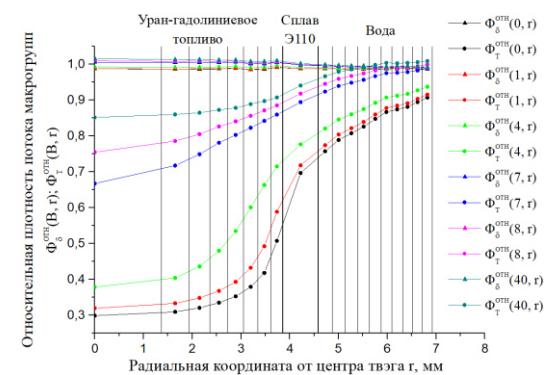
Спектральный состав (по энергиям) плотности потока нейтронов является важным фактором для процесса выгорания ВП. Спектры нейтронов недозамедленных сред активных зон реактора ВВЭР (рассмотренные в данной работе) с урановым и уран-плутониевым топливом характеризуются различной жесткостью:  $\Phi_b/\Phi_m=6,024$  и  $\Phi_b/\Phi_m=11,765$  соответственно.

Расчетное моделирование распределения плотности потока нейтронов по энергетическим группам проводилось для

наиболее удаленного от центра кассеты твэга с разбиением его на 8 слоев.

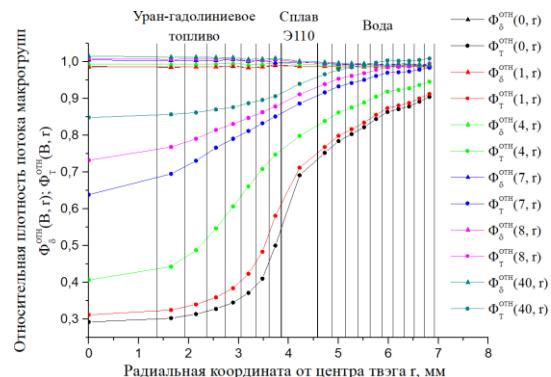
Распределение плотностей потоков нейтронов по энергиям в урановом топливе на разных глубинах выгорания топлива представлено на рисунках 6 и 7. Нормировка потоков осуществлялась по среднему значению потока в макрогруппе по всему объему ТВС с целью нивелирования эффекта увеличения плотности потока нейтронов для поддержания прежней мощности топливной сборки, выражения (1):

$$\Phi_m^{opt}(B, r) = \frac{\Phi_m(B, r)}{\Phi_m(B)}; \Phi_b^{opt}(B, r) = \frac{\Phi_b(B, r)}{\Phi_b(B)}. \quad (1)$$



**Рисунок 6.** Распределение плотности потока нейтронов в быстрой и тепловой макрогруппах по радиусу твэга, оболочки и слоев жидкости в ТВС с урановым топливом (САПФИР\_95) [составлено авторами]

**Figure 6.** Distribution of the neutron flux density in fast and thermal macrogroups along the radius of the fuel element, shell, and liquid layers in fuel assemblies with uranium fuel (SAPHIR\_95) [compiled by the authors]



**Рисунок 7.** Распределение плотности потока нейтронов в быстрой и тепловой макрогруппах по радиусу твэга, оболочки и слоев жидкости в ТВС с урановым топливом (САПФИР\_РФ) [составлено авторами]

**Figure 7.** Distribution of the neutron flux density in fast and thermal macrogroups along the radius of the fuel element, shell, and liquid layers in fuel assemblies with uranium fuel (SAPHIR\_RF) [compiled by the authors]

Результаты, полученные при расчете в САПФИР\_95 и САПФИР\_РФ, качественно не отличаются. На нулевом и первом шаге выгорания заметен эффект самоэкранирования ВП для нейтронов тепловой области. По мере выгорания материала поглотителя происходит увеличение плотности потока тепловых нейтронов внутри твэга и в слоях замедлителя, примыкающих к нему. Видно незначительное изменение распределения плотности потока тепловых нейтронов между глубинами выгорания 8 МВт·сут/кг и 40 МВт·сут/кг, что говорит о неактивном прогорании ВП в этот период времени. Распределение потока быстрых нейтронов по материалу поглотителя постоянно и несколько снижено в области материала оболочки и водных слоев. С увеличением глубины выгорания эта разница увеличивается.

Распределение плотностей потоков нейтронов по энергиям в смешанном уран-плутониевом топливе на разных глубинах выгорания топлива приведено на рисунках 8 и 9. ПС САПФИР\_95 и САПФИР\_РФ качественно показывают идентичные картины выгорания твэга. На начальных шагах выгорания заметен эффект самоэкранирования ВП нейтронов тепловой макрогруппы. Степень самоэкранирования меньшая, чем в случае рассмотрения ТВС с урановым топливом, что связано с повышенной жесткостью спектра.

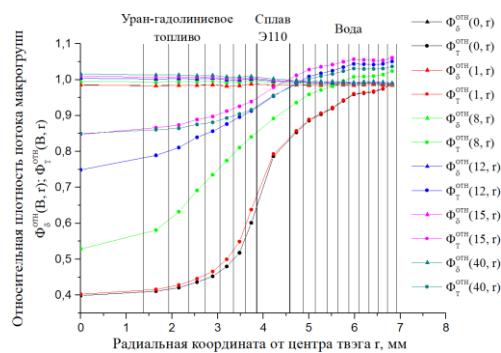


Рисунок 8. Распределение плотности потока нейтронов в быстрой и тепловой макрогруппах по радиусу твэга, оболочки и слоев жидкости в ТВС со смешанным уран-плутониевым топливом (САПФИР\_95) [составлено авторами]

Figure 8. Distribution of the neutron flux density in fast and thermal macrogroups along the radius of the fuel element, shell, and liquid layers in fuel assemblies with mixed uranium-plutonium fuel (SAPHIR\_95) [compiled by the authors]

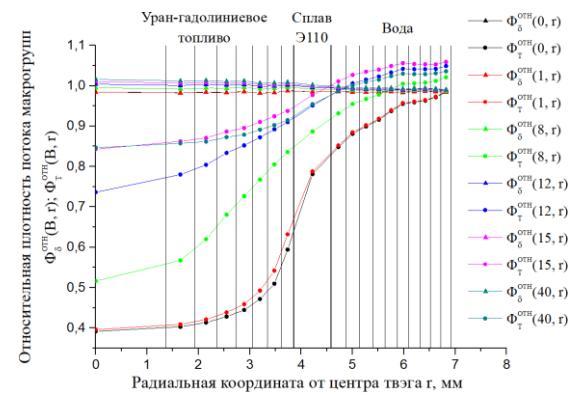


Рисунок 9. Распределение плотности потока нейтронов в быстрой и тепловой макрогруппах по радиусу твэга, оболочки и слоев жидкости в ТВС со смешанным уран-плутониевым топливом (САПФИР\_РФ) [составлено авторами]

Figure 9. Distribution of the neutron flux density in fast and thermal macrogroups along the radius of the fuel cell, shell, and liquid layers in fuel assemblies with mixed uranium-plutonium fuel (SAPHIR\_RF) [compiled by the authors]

По мере выгорания твэга в материале ВП увеличивается плотность потока тепловых нейтронов. Также она растет в оболочке и прилегающих слоях теплоносителя, но с несколько меньшей интенсивностью. Изменения в распределении потока тепловых нейтронов после глубины выгорания в 15 МВт·сут/кг не наблюдается, что свидетельствует о завершении процесса активного выгорания ВП. Картина распределения плотности потока быстрых нейтронов аналогична распределению в случае ТВС с урановым топливом.

## Заключение

Расчеты, проведенные в программах САПФИР\_95 и САПФИР\_РФ, имеют результаты близкие по отношению к данным, полученным в программах MCU, TVS-M, WIMS8A, HELIOS, MULTICELL. Относительно результатов расчетов бенчмарка, САПФИР\_РФ по сравнению с САПФИР\_95 точнее описывает зависимость  $K_{\text{inf}}(B)$  на малых глубинах выгорания и несколько завышает значения на высоких глубинах выгорания топлива. Выявленное отличие при расчете выгорания вызвано использованием различных библиотек микроскопических сечений: БНАБ-78/С-95 для САПФИР-95 и РОСФОНД для САПФИР-РФ. То есть на

высоких глубинах выгорания САПФИР\_95 моделирует зависимость  $K_{inf}(B)$  ближе к значениям, известным из бенчмарка. Максимальное отклонение расчетов с использованием программы САПФИР\_95 составило: для ТВС с урановым топливом 0,78 %, для ТВС со смешанным уран-плутониевым топливом 0,9 %. Для программы САПФИР\_РФ отклонения равны 1,04 % и 1,41 % соответственно.

Моделирования ТВС с урановым и смешанным уран-плутониевым топливом в программах нейтронно-физического расчета инженерного класса САПФИР\_95 и САПФИР\_РФ показали необходимость разбиения твэгов на регистрационные зоны. Рекомендуется при моделировании твэгов в недозамедленных системах с жесткостью спектра от 4 до 8, характерной для ТВС ре-

актора ВВЭР-1000, и размерами твэга более 1,5 от длины свободного пробега тепловых нейтронов, разбивать материал поглотителя на 4÷8 слоев. В системах с более жестким спектром при размерах твэга 1,2 от длины свободного пробега тепловых нейтронов рекомендуется разбивать твэг на 2÷4 слоя. При больших относительных размерах поглощающего материала рекомендуется разбиение твэга на 4 и более слоя.

В отличие от активной зоны с более жестким спектром нейтронов, в недозамедленной системе с урановым топливом применение СВП приводит к существенному снижению коэффициента размножения. В сборках со смешанным уран-плутониевым топливом можно снизить использование уран-гадолиниевых СВП или вовсе отказаться от них.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Волков В.С., Лукьянов А.С., Чепкунов В.В., Шевяков В.П., Ямников В.С. Применение выгорающих поглотителей в ядерных реакторах. *Атомная энергия*. 1961;11(2):109–121. Режим доступа: [https://elib.biblioatom.ru/text/atomnaya-energiya\\_t11-2\\_1961/p122/](https://elib.biblioatom.ru/text/atomnaya-energiya_t11-2_1961/p122/) (дата обращения: 29.07.2025). Volkov V.S., Lukyanov A.S., Chepkunov V.V., Shevyakov V.P., Yamnikov V.S. The use of burnable absorbers in nuclear reactors. *Nuclear energy*. 1961;11(8):109–121. (In Russ.). Available at: [https://elib.biblioatom.ru/text/atomnaya-energiya\\_t11-2\\_1961/p122/](https://elib.biblioatom.ru/text/atomnaya-energiya_t11-2_1961/p122/) (accessed: 29.07.2025).
2. Крюков В.В., Пономаренко В.Б. Органы регулирования реакторов ВВЭР. Машиностроение ядерной техники. Книга 1. Москва: Машиностроение, 2005. С. 505–509. Режим доступа: [https://elib.biblioatom.ru/text/mashinostroenie-yadernoy-tehniki\\_kn1\\_2005/p507/](https://elib.biblioatom.ru/text/mashinostroenie-yadernoy-tehniki_kn1_2005/p507/) (дата обращения: 28.05.2025). Kryukov V.V., Ponomarenko V.B. Bodies regulirovaniya reactors LWR. Mashinostroenie yadernoj tekhniki. Book 1. Moscow: Mashinostroenie, 2005. P. 505–509. (In Russ.). Available at: [https://elib.biblioatom.ru/text/mashinostroenie-yadernoy-tehniki\\_kn1\\_2005/p507/](https://elib.biblioatom.ru/text/mashinostroenie-yadernoy-tehniki_kn1_2005/p507/) (accessed: 28.05.2025).
3. Антонов С.Н., Рusanov A.Д., Устинов А.Н., Fateev M.Ф. и др. Расчет нейтронно-физических характеристик бенчмарка FullCore по программам TDMCC и «САПФИР\_95&RC\_ВВЭР». ВАНТ. Сер. Математическое моделирование физических процессов. 2020;1:20–33. Режим доступа: [https://vant.vniief.ru/publication/vant\\_math/2020/120/files/20-33.pdf](https://vant.vniief.ru/publication/vant_math/2020/120/files/20-33.pdf) (дата обращения: 29.07.2025). Antonov S.N., Rusanov A.D., Ustinov A.N., Fateev M.F. et al. Calculation of the neutron-physical characteristics of the FullCore benchmark according to the TDMCC and SAPHIR\_95&RC\_VVER programs. VANT, Ser. Mathematical Modeling of Physical Processes. 2020;1:20–33. (In Russ.). Available at: [https://vant.vniief.ru/publication/vant\\_math/2020/120/files/20-33.pdf](https://vant.vniief.ru/publication/vant_math/2020/120/files/20-33.pdf) (accessed: 29.07.2025).
4. Музафаров А.Р., Савандер В.И. Использование выгорающих поглотителей в реакторах типа ВВЭР для снижения доли запаса реактивности, компенсируемого жидкостной системой при удлиненных кампаниях. *Глобальная ядерная безопасность*. 2022;(2):42–55. <https://doi.org/10.26583/gns-2022-02-05> Muzaferov 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. Музафаров А.Р., Савандер В.И. Использование выгорающих поглотителей для снижения водообмена при жидкостном регулировании в реакторах типа ВВЭР. *Атомная энергия*. 2023;134(5-6):216–221. Режим доступа: <https://www.j-atomicenergy.ru/index.php/ae/article/view/5300/5288> (дата обращения: 29.07.2025). Muzaferov A.R., Savander V.I. Use of burnable absorbers for reducing water exchange during the VVER liquid control. *Nuclear energy*. 2023;134:290–298. <https://doi.org/10.1007/s10512-024-01057-z>
6. Внуков Р.А., Колесов В.В., Котов Я.А., Жаворонкова И.А. Исследование оптимального размещения выгорающего поглотителя в ТВС реактора ВВЭР-1200. Физика. Технологии. Инновации : тезисы докладов VIII

Международной молодежной научной конференции (Екатеринбург, 17–21 мая 2021 г.). Екатеринбург : УрФУ, 2021. С. 142–144. Режим доступа: <https://elar.urfu.ru/handle/10995/124270> (дата обращения: 29.07.2025).

1. Vnukov R.A., Kolesov V.V., Kotov Ya.A., Zhavoronkova I.A. Research of the optimal placement of a burnable absorber in fuel assemblies of a wwer-1200 reactor. *Physics. Technologies. Innovations. Abstracts of the VIII International Youth Scientific Conference (Yekaterinburg, May 17–21, 2021)*. Yekaterinburg: Ural Federal University, 2021. P. 142–144. (In Russ.). Available at: [https://vant.vniief.ru/publication/vant\\_math/2020/120/files/20-33.pdf](https://vant.vniief.ru/publication/vant_math/2020/120/files/20-33.pdf) (accessed: 29.07.2025).

2. Внуков Р.А., Жаворонков И.А., Колесов В.В., Карпович Г.В. Подходы к оптимизации глубины выгорания с помощью радиального профилирования твэга. *Ученые записки физического факультета Московского университета*. 2021;1(2110303):1–6. Режим доступа: <http://uzmu.phys.msu.ru/file/2021/1/2110303.pdf> (дата обращения: 29.07.2025).

3. Vnukov R.A., Zhavoronkov I.A., Kolesov V.V., Karpovich G.V. Approaches to optimizing the burnup depth using radial TVEG profiling. *Uchenye zapiski fizicheskogo fakul'teta Moskovskogo iniversiteta*. 2021;1(2110303):1–6. (In Russ.). Available at: <http://uzmu.phys.msu.ru/file/2021/1/2110303.pdf> (accessed: 29.07.2025).

4. Энциклопедия нейтронных данных РОСФОНД. Полный пакет обоснования отбора оценок. ФГУП ГНЦ РФ Физико-энергетический институт. Обнинск, 2006. Режим доступа: [https://xn--80ahadac6cday6jf5b.xn--plai/data/links/Obosnovanie\\_ROSFOND.pdf](https://xn--80ahadac6cday6jf5b.xn--plai/data/links/Obosnovanie_ROSFOND.pdf) (дата обращения: 29.07.2025).

5. ROSFOND Encyclopedia of Neutron Data. A complete package of justification for the selection of grades. FSUE SSC RF Institute of Physics and Energy. Obninsk, 2006. (In Russ.). Available at: [https://xn--80ahadac6cday6jf5b.xn--plai/data/links/Obosnovanie\\_ROSFOND.pdf](https://xn--80ahadac6cday6jf5b.xn--plai/data/links/Obosnovanie_ROSFOND.pdf) (accessed: 29.07.2025).

6. Data Formats and Procedures for the Evaluated Nuclear Data File ENDF/B-VI and ENDF/B-VII. Report BNL-NCS-44945-05-Rev. 2005. Available at: <https://www.nndc.bnl.gov/endf-b6.8/endf-102-endf6.8.pdf> (accessed: 29.07.2025).

7. NEA/NSC/DOC. A VVER-1000 LEU and MOX Assembly Computational Benchmark. Nuclear Energy Agency, 2002. Available at: <https://oecd-nea.org/upload/docs/application/pdf/2020-01/nsc-doc2002-10.pdf> (accessed: 29.07.2025).

8. Гомин Е.А., Гуревич М.И., Жирнов А.П., Калугин М.А. и др. Программа MCU-FCP для расчета переноса нейтронов методом вероятностей первых столкновений. *Атомная энергия*. 2008;105(2):67–72. Режим доступа: <https://www.j-atomicenergy.ru/index.php/ae/article/view/2416/2393> (дата обращения: 29.07.2025).

9. Gomin, E.A., Gurevich, M.I., Kalugin, M.A. et al. MCU-FCP program for first-collisions probability calculations of neutron transport. *Atomic Energy*. 2008;105:84–89. (In Russ.). <https://doi.org/10.1007/s10512-008-9069-y>

10. Гомин Е.А., Гуревич М.И., Майоров Л.В., Марин С. В. Описание применения и инструкция для пользователей программы MCU-RFFI расчета методом Монте-Карло нейтронно-физических характеристик ядерных реакторов. Москва: РНЦ «Курчатовский институт», 1994. 63 с. Режим доступа: <https://search.rsl.ru/ru/record/01001700902?ysclid=mi7nf0grj3731484477> (дата обращения: 29.07.2025).

11. Gomin E.A. Description of the application and instructions for users of the MCU-RFFI program for calculating the neutron-physical characteristics of nuclear reactors by the Monte Carlo method. Moscow: NRC Kurchatov Institute, 1994. 63 p. (In Russ.). Available at: <https://search.rsl.ru/ru/record/01001700902?ysclid=mi7nf0grj3731484477> (accessed: 29.07.2025).

12. Третьякович С.С., Сперанский Ф.А. Программные средства, применяемые для анализа и обоснования безопасности атомной электростанции в части нейтронно-физических вычислений. *Вестник Университета гражданской защиты МЧС Беларусь*. 2017;1(3):361–372. Режим доступа: <https://vestnik.ucp.by/arhiv/article.php?IdArt=387> (дата обращения: 29.07.2025).

13. Tretyakevich S.S., Speransky F.A. Software tools used for analysis and justification of the safety of a nuclear power plant in terms of neutron physics calculations. *Bulletin of the University of Civil Protection of the Ministry of Emergency Situations of Belarus*. 2017;1(3):361–372. (In Russ.). Available at: <https://vestnik.ucp.by/arhiv/article.php?IdArt=387> (accessed: 29.07.2025).

14. Murphy B.D., Kravchenko J., Lazarenko A., Pavlovitchev A., Sidorenko V., Chetverikov A. Simulation of Low-Enriched Uranium (LEU) Burnup in Russian VVER Reactors with the HELIOS Code Package. ORNL/TM-1999/168. Available at: [https://rsicc.ornl.gov/FMDP/TM1999\\_168.pdf](https://rsicc.ornl.gov/FMDP/TM1999_168.pdf) (accessed: 29.07.2025).

15. Dastur A.R., Buss D.B. MULTICELL – a 3-D Program for the Simulation of Reactivity Devices in CANDU. AECL Report. AECL-7544. 1983 February. ISSN 0067-0367. Available at: <https://www.google.com/url?sa=t&source=web&rct=j&opi=89978449&url=https://inis.iaea.org/records/sz44e-9cw39/files/16042389.pdf&ved=2ahUKEwiy2fuP9peRAxX-IBAIHdJlBK8QFnoECCAQAO&usg=AOvVaw08Yx2rO55mRhVtcUtkfVBu> (accessed: 29.07.2025).

16. Arsenault B., Chow H.C. Evaluation of Supercell Methodologies Using ZED-2 Measurements. 20th Annual Conference of the Canadian Nuclear Society Montreal, Quebec, Canada I May 30 – June 2, 1999. Available at: [https://www.google.com/url?sa=t&source=web&rct=j&opi=89978449&url=https://proceedings.cns-snc.ca/index.php/pcns/article/download/3372/3371/3407&ved=2ahUKEwicybOE\\_5eRAxU4TVUIHQ-wLzAQFnoECBwQAO&usg=AOvVaw00rLSSawSjiWPCZFiQExfk](https://www.google.com/url?sa=t&source=web&rct=j&opi=89978449&url=https://proceedings.cns-snc.ca/index.php/pcns/article/download/3372/3371/3407&ved=2ahUKEwicybOE_5eRAxU4TVUIHQ-wLzAQFnoECBwQAO&usg=AOvVaw00rLSSawSjiWPCZFiQExfk) (accessed: 29.07.2025).

17. Семишин В.В. Оценка нейтронно-физических свойств активной зоны реактора ВВЭР-1000 при использовании регенерированного уран-плутониевого топлива. *Известия вузов. Ядерная энергетика.* 2023;2:15–26. <https://doi.org/10.26583/npe.2023.2.02>

Semishin V.V. Evaluation of Neutronic Performance for the VVER 1000 Reactor Core with Regenerated Uranium Plutonium Fuel. *Izvestiya vuzov. Yadernaya Energetika.* 2023;2:15–26. (In Russ.). <https://doi.org/10.26583/npe.2023.2.02>

18. Бобров Е.А. Исследование характеристик замыкания топливного цикла реакторов ВВЭР на основе РЕМИКС-технологии. Диссертация кандидата технических наук. Москва: НИЦ «Курчатовский институт», 2016. 129 стр. Режим доступа: <https://www.disscat.com/content/issledovanie-kharakteristik-zamykaniya-toplivnogo-tsikla-reaktorov-vver-na-osnove-remiks-tek> (дата обращения: 29.07.2025).

Bobrov E.A. Investigation of the characteristics of the fuel cycle closure of VVER reactors based on REMIX technology. Dissertation of the Candidate of Technical Sciences. Moscow: SIC "Kurchatov Institute", 2016. 129 p. (In Russ.). Available at: <https://www.disscat.com/content/issledovanie-kharakteristik-zamykaniya-toplivnogo-tsikla-reaktorov-vver-na-osnove-remiks-tek> (accessed: 29.07.2025).

ВКЛАД АВТОРОВ:

**Кириллов К.В.** – проведение расчетов, визуализация, исследование;

**Ахметова П.В.** – обзор и редактирование, исследование;

**Семишин В.В.** – методология, программное обеспечение, редактирование;

**Столотнюк Я.Д.** – редактирование, исследование.

AUTHORS' CONTRIBUTION:

**Kirillov K.V.** – calculations, visualization, investigation;

**Akhmetova P.V.** – review and editing, investigation;

**Semishin V.V.** – methodology, software, editing;

**Stolotnyuk Ya.D.** – review and editing, investigation.

ИСТОЧНИКИ ФИНАНСИРОВАНИЯ:

Работа выполнена без дополнительных источников финансирования.

FUNDING:

No additional funding.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ:

Конфликта интересов нет.

CONFLICT OF INTEREST:

No conflict of interest.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ:

**Кирилл Вячеславович Кириллов**, кафедра «Ядерные реакторы и установки» МГТУ им. Н.Э. Баумана, г. Москва, Российская Федерация.

e-mail: kkirillov2002@mail.ru

**Полина Виленна Ахметова**, кафедра «Ядерные реакторы и установки», МГТУ им. Н.Э. Баумана, г. Москва, Российская Федерация.

e-mail: akhmetovapv@student.bmstu.ru

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

e-mail: semishin@bmstu.ru

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

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

e-mail: stolotyrd@bmstu.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS:

**Kirill V. Kirillov**, Department of nuclear reactors and installations, BMSTU, Moscow, Russian Federation.  
e-mail: kkirillov2002@mail.ru

**Polina V. Akhmetova**, Department of nuclear reactors and installations, BMSTU, Moscow, Russian Federation.  
e-mail: akhmetovapv@student.bmstu.ru

**Viktor V. Semishin**, Senior Lecturer, Department of nuclear reactors and installations, BMSTU, Moscow, Russian Federation.  
e-mail: semishin@bmstu.ru

**Yaroslava D. Stolotnyuk**, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor Department of nuclear reactors and installations, BMSTU, Moscow, Russian Federation.  
<https://orcid.org/0009-0006-1831-0228>

e-mail: stolotyrd@bmstu.ru

Поступила в редакцию / Received 18.08.2025

После доработки / Revision 05.11.2025

Принята к публикации / Accepted 11.11.2025