

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-2025-02-05>

EDN IMZUZC

Оригинальная статья / Original paper



Расчетное моделирование нейтронно-физических характеристик активной зоны водо-водяного реактора с изменяемым спектром нейтронов

И.Ш. Кускеев , В.В. Семишин , Е.А. Лебедева , Я.Д. Столотнюк  

Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана, г. Москва, Российская Федерация
 stolot24@mail.ru

Аннотация. Представлена расчетная оценка нейтронно-физических характеристик активной зоны водо-водяного реактора с изменяющимся спектром нейтронов. 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. Разработаны модели тепловыделяющих сборок (ТВС) с направляющими каналами под размещение поглощающих элементов или подвижных вытеснителей, формирующих две активные зоны с одинаковой тепловой мощностью и различными способами регулирования реактивности: борным и спектральным (с частичным борным). Для частичной компенсации избыточной реактивности применялись тепловыделяющие элементы с гадолинием (ТВЭГ) в виде Gd_2O_3 с концентрацией 5 % весовых. В качестве материала вытеснителей применен оксид урана UO_2 (уран с природным содержанием U^{235}). Рассмотрены два способа извлечения вытеснителей: линейное перемещение в процессе кампании и полное извлечение вытеснителей (неподвижных с начала кампании) на 326 сутки не приводят к существенному изменению критической концентрации борной кислоты. Показано, что применение спектрального регулирования позволяет снизить концентрацию борной кислоты в теплоносителе на 35 процентов. Показано, что коэффициенты реактивности по температуре топлива, теплоносителя, плотности теплоносителя увеличиваются по модулю в процессе кампании, сохраняя свой знак. Величина коэффициента реактивности по концентрации борной кислоты в первом контуре реактора, зависящая от водо-уранового отношения уменьшается по модулю. Максимальное значение коэффициента неравномерности энерговыделения по высоте активной зоны со спектральным регулированием составило 1,6. Рассмотрена возможность использования в качестве органов аварийной защиты поглощающих стержней, размещенных в направляющих каналах ТВС.

Ключевые слова: спектральное регулирование, ВВЭР-С, спектр нейтронов, стержни-вытеснители, жидкостное борное регулирование, коэффициент реактивности.

Для цитирования: 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. <https://doi.org/10.26583/gns-2025-02-05>

For citation: 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. *Nuclear Safety*. 2025;15(1):46–55. (In Russ.). <https://doi.org/10.26583/gns-2025-02-05>

Computational modeling of the neutron-physical characteristics of the core of a water-cooled reactor with a variable neutron spectrum

Iskander Sh. Kuskeev , Viktor V. Semishin , Ekaterina A. Lebedeva ,
Yaroslava D. Stolotnyuk  

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation
 stolot24@mail.ru

Abstract. A calculated estimate of the neutron-physical characteristics of a light-water reactor core with a changing neutron spectrum is presented. The software tool DESNA-7 neutron physics module, designed for three-dimensional modelling of the core in a two-group approximation, is used. The calculation of the neutron-physical cross sections is carried out in the software tool SAPHIR-95.1. Fuel assembly models with guide channels for the placement of absorbing elements or mobile displacers is developed forming two cores with the same thermal power and different ways of regulating reactivity: boron and spectral (with partial boron). To compensate the excess reactivity partially, gadolinium fuel rods in the form of Gd_2O_3 with a concentration of 5% by weight are used. Uranium oxide with natural content of U^{235} is used as the material for the displacers. The two methods of displacer extraction are considered: linear displacement during the campaign and complete extraction of displacers (stationary from the beginning of the campaign) on day 326. They do not lead to a significant change in the critical concentration of boric acid. It is shown that the use of spectral regulation makes it possible to reduce the concentration of boric acid in the coolant by 35 percent. It is shown that the reactivity coefficients in terms of temperature of fuel and coolant, and density of coolant increase modulo during the campaign, maintaining their sign. The value of the reactivity coefficient for the concentration of boric acid in the first reactor circuit, depending on the water-uranium ratio, decreases modulo. The maximum value of the axial power peaking factor in the core with spectral regulation is 1.6. The possibility of using absorbing rods placed in the fuel assembly guide channels as emergency protection devices is considered.

Keywords: spectral regulation, VVER-S, neutron spectrum, displacers rods, liquid boron regulation, reactivity coefficient.

Введение

В рамках поставленных правительством задач стратегия развития ядерной энергетики с переходом к двухкомпонентной структуре на базе тепловых и быстрых реакторов с замыканием ядерного топливного цикла предписывает два направления развития технологии водо-водяных энергетических реакторов (ВВЭР): совершенствование традиционной технологии, включая внедрение РЕМИКС и МОКС-топлива, и разработку новых проектов с улучшенными экономическими характеристиками и повышенным воспроизводством топлива^{1,2}.

Одним из перспективных проектов дальнейшего развития технологии реакторов на тепловых нейтронах является проект реактора ВВЭР-С³. Проект реакторной установки (РУ) ВВЭР-С со спектральным регу-

лированием обладает следующими основными преимуществами⁴.

1. Снижение топливной составляющей эксплуатационных затрат.
2. Возможность 100% загрузки активной зоны МОКС-топливом.
3. Снижение количества жидких радиоактивных отходов (ЖРО).
4. В перспективе снижение капитальных затрат вследствие отказа от проектирования и строительства борного узла.

Особенность данного проекта – управление реактивностью изменением спектра нейтронов. Суть этого способа регулирования заключается в изменении замедляющей способности активной зоны в процессе выгорания топлива. При увеличении энергии нейтронов, число их взаимодействий с ядрами элементов с последующим замедлением уменьшается, как следствие, нейтроны остаются в надтепловой области, где помимо снижения вероятности деления делящихся ядер, возрастает число реакций с резонансным поглощением нейтронов, что приводит к уменьшению избыточного запаса реактивности [1].

¹ Энергетическая стратегия Российской Федерации на период до 2035 года: утверждена распоряжением правительства Рос. Федерации от 9 июня 2020 г. № 1523-р. – Режим доступа: <http://static.government.ru/media/files/w4sigFOiDjGVDYT4IgsApssm6mZRb7wx.pdf> (дата обращения: 17.02.2025).

² Стратегия развития атомной энергетики России в первой половине 21 века. Москва: ФГУП ЦНИИАтоминформ, 2001. – 64 с. – Режим доступа: https://elibr.biblioatom.ru/text/strategiya-atomnoy-energetiki-21-veka_2001/p0/ (дата обращения: 17.02.2025).

³ Беззубцев В.С. Опережающее технологическое развитие электроэнергетического дивизиона. *РЭА*. 2019(12):6–9. Режим доступа: <https://publicatom.ru/blog/zhurnal-rosergoatom/60001/> (дата обращения 17.02.2025).

⁴ АО ОКБ «ГИДРОПРЕСС» 75 лет. А.К. Подшибякин, С.Р. Сорокин, С.О. Титова и др.; гл. ред. В.А. Пиминев. – Подольск: ОАО «ПФОП», 2021. – С. 107–109. – ISBN 978-5-94883-161-9. Режим доступа: https://elibr.biblioatom.ru/text/okb-gidropress-75-let_2021/p0/ (дата обращения: 19.02.2025).

Механический метод спектрального регулирования, предполагающий изменение водо-уранового отношения в ходе кампании, реализуется путем перемещения стержней-вытеснителей в ТВС⁵: введение стержней-вытеснителей уменьшает долю замедлителя в активной зоне, и ужесточает спектр нейтронов, извлечение стержней приводит к обратному – увеличению доли замедлителя и, как следствие, смягчению спектра.

Для обеспечения качества проектирования разрабатываемых реакторов необходимым этапом является выполнение поверочных расчетов в независимых программных комплексах, использующих различные методики и алгоритмы. В большинстве опубликованных источниках отсутствует информация о методиках и средствах, применяемых при обосновании реакторов со спектральным регулированием. Исключением является работа А.И. Элазаки [1], в которой показано, что расчеты проводились с использованием кода SERPENT2 (трехмерный код на основе метода Монте-Карло) с библиотеками поперечных сечений ENDF/B. В данной работе использовался нейтронно-физический модуль программного средства (ПС) DESNA-7, входящий в программный комплекс RAINBOW [2]. Программное средство DESNA-7 предназначено для моделирования динамических и установившихся процессов в водо-водяных реакторных установках типа ВВЭР с учетом трехмерной динамики активной зоны в двухгрупповом показетном приближении.

Целью работы является расчетное моделирование топливной кампании водо-водяного ядерного реактора с изменяемым спектром нейтронов для оценки влияния наличия вытеснителей и изменяющегося спектра нейтронов в ходе топливной кампании на нейтронно-физические характери-

сти активной зоны (интегральные эффективности органов регулирования системы управления и защиты, коэффициенты реактивности, длительности топливных кампаний). В данной работе приведено описание разработанной модели активной зоны, результаты расчетов топливных кампаний, сравнение с топливной кампанией реактора типа ВВЭР средней мощности с жидкостным борным регулированием.

Описание расчетной модели

Расчет нейтронно-физических сечений для ПС DESNA-7 производился в ПС САПФИР-95.1⁶, где используется библиотека микроскопических нейтронных сечений БНАБ-78/С-95 (применяется для расчетов малогазопровых характеристик ячеек водо-водяных и уран-графитовых реакторов для диффузионных программ). Исходные данные для ПС САПФИР-95 представлены в таблице 1. Активная зона рассматриваемого реактора в ПС Десна-7 моделируется системой из 163 шестигранных параллельных каналов. В данной работе рассматривается первая топливная загрузка, активная зона состоит из ТВС с обогащением по ²³⁵U от 2% до 4%. Проводился расчетный анализ двух активных зон с одинаковой мощностью и различными способами регулирования реактивности. Для моделирования активной зоны водо-водяного реактора с борным регулированием (ВВЭР) разработана модель ТВС+ (рис. 1), с направляющими каналами под поглощающие элементы (ПЭЛ). Для активной зоны реактора со спектральным регулированием (ВВЭР-С) – ТВС-С (рис. 2), в направляющих каналах которой перемещается подвижный вытеснитель.

⁵ 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/ufiles/2014/Plenar/Semchenkov_YU.M..pdf?ysclid=m9q7kqgz115756351 (дата обращения: 19.02.2025).

⁶ Программа САПФИР_95.1 с библиотекой констант БНАБ-78/С-95 для нейтронно-физических расчетов ячеек тепловых ядерных реакторов: описание применения. Государственная корпорация по атомной энергии «Росатом», 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_95.1.1.pdf (дата обращения 21.02.2025).

Таблица 1. Исходные данные для ПС САПФИР-95
Table 1. The initial data for the software tool SAPHIR-95.1

Параметр	Значение
Количество твэлов в ТВС, шт. (см. постраничную сноску 5)	264
Количество ТВЭГ в ТВС, шт.	12
Шаг решетки твэлов, м (см. постраничную сноску 5)	0.01164
Шаг решетки ТВС, м	0.236
Размер ТВС под ключ, м (см. постраничную сноску 5)	0.234
Диаметр твэла, м (см. постраничную сноску 5)	0.091
Материал вытеснителей	UO ₂ (уран с природным содержанием ²³⁵ U)

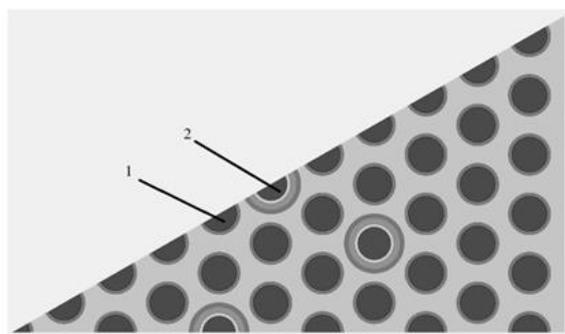


Рисунок 1. Расчетная модель ТВС+, реализованная в ПС САПФИР-95.1: 1 – ТВЭЛ, 2 – Направляющий канал под ПЭЛ

Figure 1. The calculation model TVS+ implemented in the SAPHIR-95.1 software: 1 is fuel element, 2 is guide channel for the absorbing element

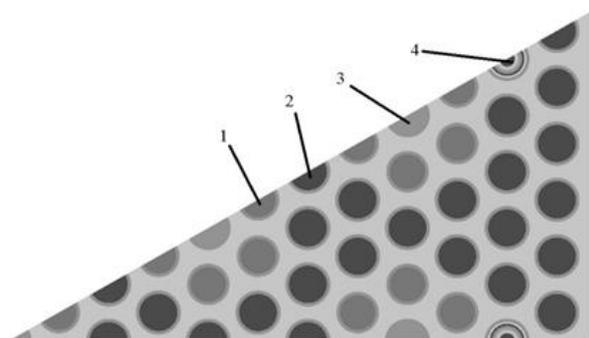


Рисунок 2. Расчетная модель ТВС-С, реализованная в ПС САПФИР-95.1: 1 – вытеснитель из природного урана, 2 – ТВЭЛ, 3 – циркониевый стержень, 4 – ТВЭГ

Figure 2. The calculation model TVS-C implemented in the SAPHIR-95.1 software: 1 is natural uranium displacer, 2 is fuel element, 3 is zirconium rod, 4 is gadolinium fuel cell

Часть избыточной реактивности компенсируется выгорающим поглотителем, расположенным в тепловыделяющем элементе. В качестве выгорающего поглотителя используется гадолиний природного состава в форме Gd₂O₃ [3]. Природный гадолиний включает в себя семь изотопов, наибольшее сечение поглощения нейтронов у ¹⁵⁷Gd ($253254 \cdot 10^{-28} \text{ м}^2$ в тепловой точке [4]). Для снижения скорости прогорания поглотителя, его располагают в ограниченном числе твэл (в шести), но с большой концентрацией (5 % весовых), что позволило создать условия для самоэкранировки выгорающего поглотителя [5]. Для корректного расчета послойного выгорания тепловыделяющих элементов с гадолинием (ТВЭГ), объем ТВЭГа разбивался по радиусу на 6 расчетных зон.

В качестве поглощающих элементов в водо-водяном реакторе (ВВЭР) применялись стержни из карбида бора В₄С с природным содержанием изотопов бора: концентрация В¹⁰ составляет 19.8%, В¹¹ – 80.2%. С точки зрения захватных свойств наиболее ценным является изотоп В¹⁰, микросечение захвата которого $3820,5 \cdot 10^{-28} \text{ м}^2$ для широкого интервала энергий нейтронов, включающего тепловую и надтепловую область. Кроме того, сечение захвата В¹⁰ не имеет резонансов в надтепловой области, а взаимодействие нейтрона с данным изотопом сопровождается высвобождением относительно мягкого гамма-кванта с энергией $0.766 \cdot 10^{-13} \text{ Дж}$ [6].

Результаты и обсуждения

Расчет кампаний реакторов ВВЭР и ВВЭР-С показал, что использование спектрального регулирования позволяет снизить среднее содержание борной кислоты в теплоносителе в процессе всей кампании на 35%. Наибольшая разница в концентрациях поглотителя (63%) обеспечивается в начале кампании, когда все стержни-вытеснители погружены в активную зону.

Для активной зоны со спектральным регулированием (и частичным борным регулированием) было проведено два расчета по способу извлечения вытеснителей в процессе кампании: линейное перемещение вытеснителей в процессе всей работы и неподвижное положение стержней-вытеснителей

половину топливной кампании с полным их извлечением на 326 сутки. Расположение подвижных вытеснителей в активной зоне приведено на рисунке 3.

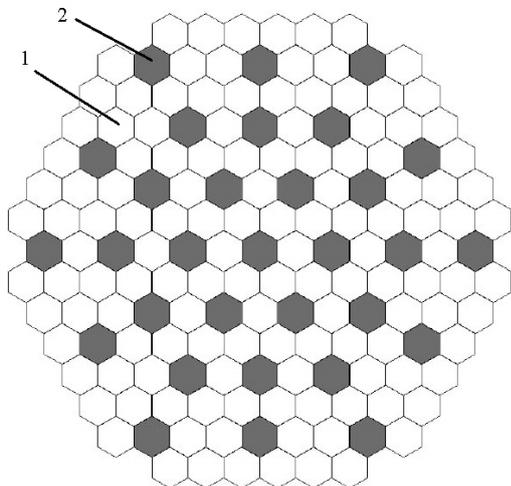


Рисунок 3. Расположение подвижных вытеснителей, участвующих в компенсации реактивности:
1 – ТВС без вытеснителя, 2 – ТВС с вытеснителем
Figure 3. Displacement of movable displacers in the core: 1 is fuel assembly without displacer, 2 is fuel assembly with displacer

Графики изменения критической концентрации борной кислоты для реактора с жидкостным и спектральным регулированием представлены на рисунке 4. Из графических зависимостей видно, что способ извлечения вытеснителей не оказывает большого влияния на концентрацию борной кислоты в процессе кампании, что в перспективе может упростить механизм управления положением органов регулирования.

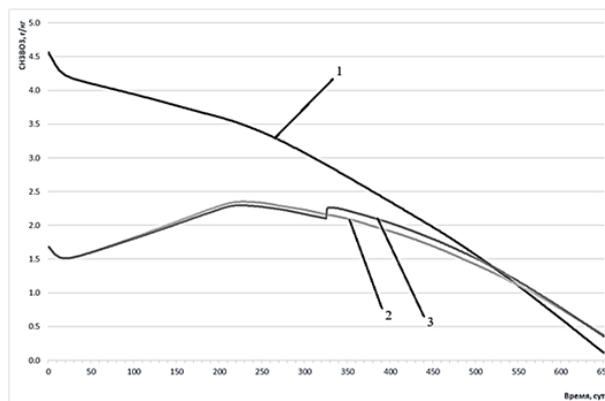


Рисунок 4. Изменение критической концентрации борной кислоты в процессе кампании реактора:
1 – Для активной зоны с жидкостным регулированием, 2 – Для активной зоны со спектральным регулированием (линейное извлечение подвижных вытеснителей), 3 – Для активной зоны со спектральным регулированием (подвижные вытеснители полностью погружены половину топливной кампании, в момент времени 325 суток, полностью извлекаются из активной зоны)

Figure 4. Change in the critical concentration of boric acid during reactor operation: 1 is for a liquid-controlled core, 2 is for a spectral-controlled core (linear extraction of mobile displacers), 3 is for a spectral-controlled core (mobile displacers are completely submerged for half of the fuel campaign, at a time of 325 days, they are completely extracted from the core)

Расчитанные коэффициенты реактивности в номинальном режиме работы для обоих типов топливных загрузок на начало и конец кампании приведены в таблице 2. Относительные погрешности вычисления коэффициентов реактивности составляют: по температуре теплоносителя (с учетом изменения его плотности) 20 %, по плотности теплоносителя 20 %, по температуре топлива 10 %, по концентрации борной кислоты 5 %.

Таблица 2. Коэффициенты реактивности активных зон ВВЭР и ВВЭР-С
Table 2. The reactivity coefficients of the VVER u VVER-S cores

Тип реактора (время)	$\frac{d\rho}{dt_M}, 10^{-5} \text{ C}^{-1}$	$\frac{d\rho}{dt_U}, 10^{-5} \text{ C}^{-1}$	$\frac{d\rho}{d\gamma}, 10^{-4} \text{ м}^3/\text{кг}$	$\frac{d\rho}{dC}, \text{ г}/\text{кг}$
ВВЭР (начало кампании)	-12.28	-2.80	2.03	-1.55
ВВЭР (конец кампании)	-46.03	-3.02	2.61	-1.03
ВВЭР-С (начало кампании) (все вытеснители погружены)	-21.27	-2.28	0.82	-2.34
ВВЭР-С (конец кампании)	-26.47	-2.31	1.61	-1.23

Где ρ – реактивность реактора, t_M – температура теплоносителя (°C) t_U – средняя температура топлива (°C), γ – плотность теплоносителя (кг/м³), C – концентрация борной кислоты (г/кг).

Полученные значения коэффициентов реактивности удовлетворяют «Правилам ядерной безопасности реакторных установок атомных станций»⁷.

Коэффициенты реактивности по температуре теплоносителя и топлива и плотности теплоносителя для двух рассмотренных активных зон имеют схожую динамику изменения: в процессе кампании они увеличиваются по модулю, сохраняя свой знак. Изменение значений коэффициентов реактивности по модулю в процессе выгорания топлива для ВВЭР: по температуре теплоносителя увеличение на 275%, по температуре топлива увеличение на 8%, по плотности теплоносителя увеличение на 29%. Для реактора ВВЭР-С: по температуре теплоносителя увеличение на 24%, по температуре топлива увеличение на 1%, по плотности теплоносителя увеличение на 99%. Для обеих активных зон коэффициент реактивности по концентрации борной кислоты в воде первого контура по модулю уменьшается. Такое изменение коэффициента реактивности объясняется увеличением водо-уранового отношения и как следствие, изменением спектра нейтронов в течении кампании.

Сравнение спектров нейтронов в начале кампании для реактора ВВЭР и ВВЭР-С представлено на рисунке 5, в конце – на рисунке 6. Видно, что в начале кампании в реакторе со спектральным регулированием энергетический спектр нейтронов смещен в область больших энергий по сравнению с реакторов ВВЭР, что обеспечивается погруженными вытеснителями и, как следствие, измененным водо-урановым отношением. В таком состоянии критическая концентрация борной кислоты ВВЭР-С оказалась значительно меньше.

К концу кампании водо-урановое отношение для ВВЭР-С увеличивается и превышает постоянное значение в ВВЭР, что приводит к смягчению спектра и необходимости использовать борную кислоту почти в том же объеме (разница концентраций H_3BO_3 на 645 эффективные сутки составляет 2.5%), что и в реакторе с борным регулированием. Это объясняет сближением значений коэффициентов реактивности по концентрации борной кислоты в конце кампании для обоих реакторов.

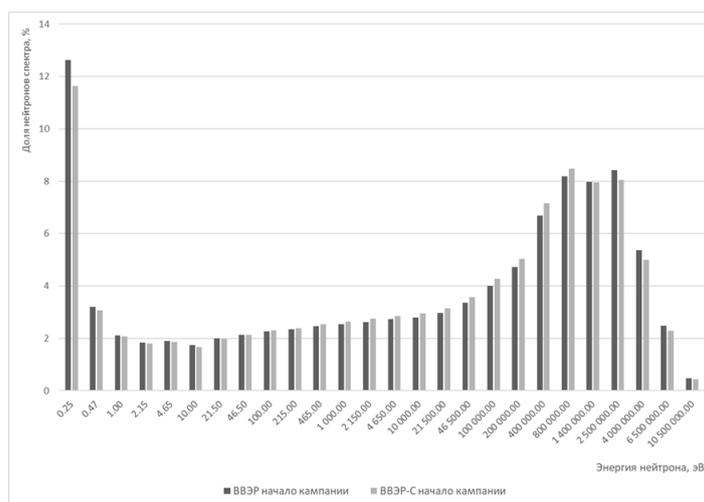


Рисунок 5. Сравнение спектра нейтронов ВВЭР и ВВЭР-С на начало кампании
Figure 5. Comparison of the VVER and VVER-S neutron spectra at the beginning of the campaign

⁷ Федеральные нормы и правила в области использования атомной энергии. Утверждены постановлением Федеральной службы по экологическому и атомному надзору от 10 декабря 2007 г. № 4. – Режим доступа: <http://cntr-nrs.gosnadzor.ru/about/AKTS/%D0%9D%D0%9F-082-07.pdf> (дата обращения: 21.02.2025).

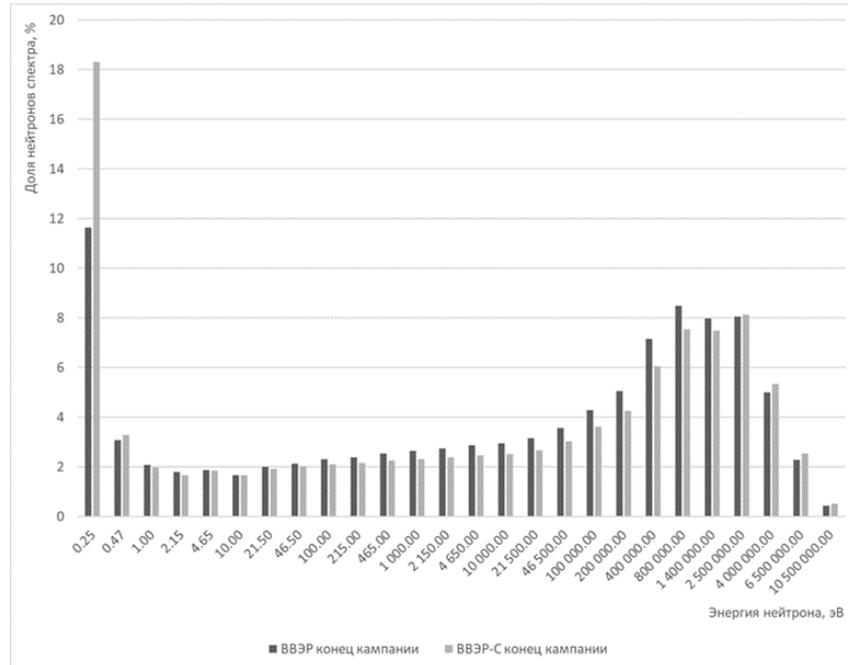


Рисунок 6. Сравнение спектра нейтронов ВВЭР и ВВЭР-С в конце кампании
Figure 6. Comparison of the VVER and VVER-S neutron spectra at the end of the campaign

Одной из особенностей реактора ВВЭР-С является значительная неравномерность энерговыделения по высоте реактора на протяжении всей кампании. Расчетные зависимости коэффициента неравномерности по высоте приведены для реактора ВВЭР на

рисунке 7 и для ВВЭР-С на рисунке 8. Максимальное значение коэффициента неравномерности энерговыделения по высоте активной зоны ВВЭР-С составило 1,6.

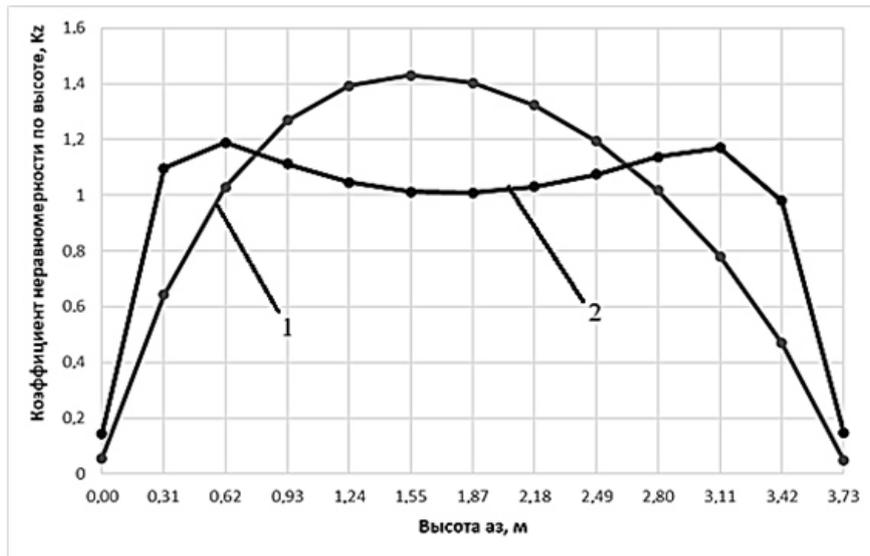


Рисунок 7. Коэффициент неравномерности энерговыделения по высоте активной зоны ВВЭР на начало (1) и конец кампании (2)

Figure 7. The axial power peaking factor in the VVER core at the beginning (1) and the end of the campaign (2)

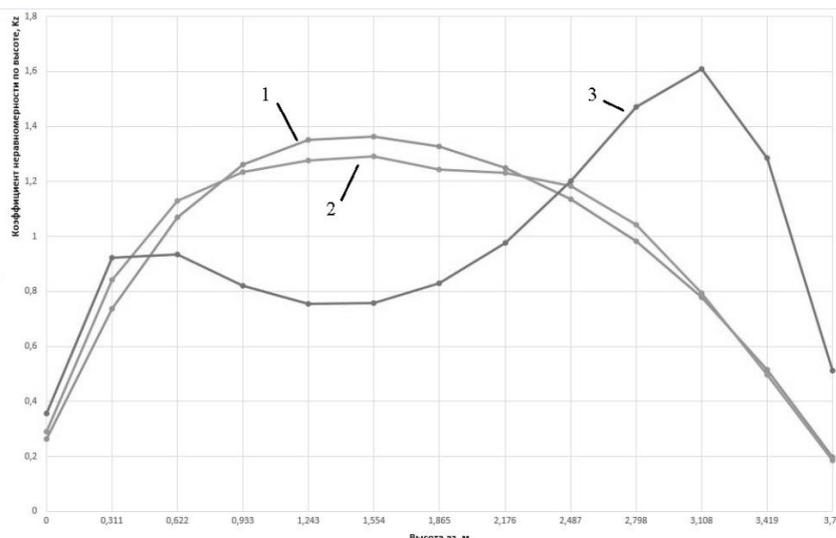


Рисунок 8. Коэффициент неравномерности энерговыделения по высоте активной зоны ВВЭР-С на начало (1), середину (2) и конец кампании (3)
Figure 8. The axial power peaking factor in the VVER-S core at the beginning (1), middle (2) and the end of the campaign (3)

При использовании в качестве органов аварийной защиты только подвижных вытеснителей ее интегральной эффективности оказывается недостаточной для выполнения критической функции безопасности (перевода реактора в подкритическое состояние): эффективность органов регулирования реактора ВВЭР составляет 13.08%, реактора ВВЭР-С – 2.66%. Поэтому была предложена возможная компоновка органов регулирования в виде ПЭЛов с карбидом бора с сохранением конструктивного исполнения каналов для размещения подвижных вытеснителей в ТВС. Для оценки эффективности органов регулирования разработана новая расчетная модель, где вместо центрального циркониевого прутка на рисунке 2 используется стержень-поглотитель из карбида бора, а урановый вытеснитель заменяется циркониевыми стержнями. Разработанная модель ТВС представлена на рисунке 9. Схема расположения ТВС с поглотителями и подвижными вытеснителями приведена на рисунке 10.

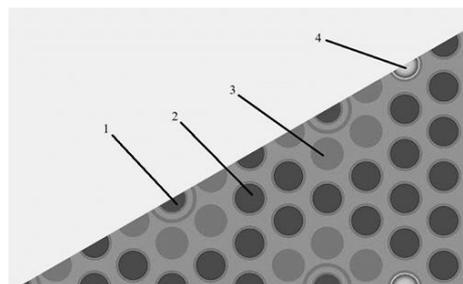


Рисунок 9. Расчетная модель ТВС-С с поглотителем, реализованная в ПС САПФИР-95.1
 1 – поглотитель из карбида бора, 2 – ТВЭЛ, 3 – циркониевый стержень, 4 – ТВЭГ
Figure 9. The TVS-C calculation model with an absorber implemented in the SAPHIR-95.1 software
 1 is boron carbide absorber, 2 is fuel element, 3 is zirconium rod, 4 is gadolinium fuel rod

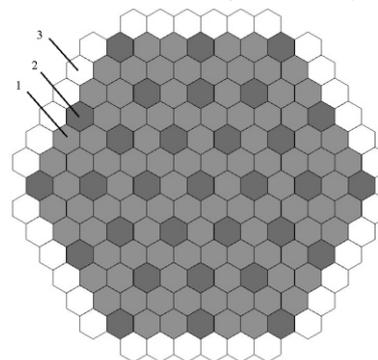


Рисунок 10. Расположение ТВС с поглотителем и ТВС с подвижными вытеснителями
 1 – ТВС с поглотителем, 2 – ТВС с вытеснителем, 3 – ТВС без поглотителя и без вытеснителя
Figure 10. Displacement absorbers and movable displacers in the core 1 is fuel assembly with absorber, 2 is fuel assembly with displacer, 3 is fuel assembly without absorber or displacer

Таким образом, при условии совместного использования как борных поглотителей, так и вытеснителей из природного урана, эффективность аварийной защиты предложенной конфигурации составила 13.74%, что соответствует эффективности аварийной защиты реактора ВВЭР без спектрального регулирования.

Заключение

Расчеты, проведенные с использованием нейтронно-физического модуля DESNA-7, показали возможность применения спектрального регулирования в реакторах типа ВВЭР средней мощности. Качественно полученные результаты хорошо согласуются с опубликованными⁸. Использование вытеснителей в качестве органов управле-

ния реактивностью позволяет снизить содержание жидкого поглотителя в первом контуре, но приводит к увеличению коэффициента неравномерности энерговыделения по высоте активной зоны, что ухудшает условия эксплуатации конструкционных материалов. С точки зрения коэффициентов реактивности спектральное регулирование, как и жидкостное, удовлетворяет правилам ядерной безопасности реакторных установок и атомных станций.

Для решения задачи осуществления аварийной защиты для реактора со спектральным управлением предложено в качестве органов аварийной защиты применить стержни-поглотители, что обеспечивает эффективность ОР, сравнимую с показателями реактора ВВЭР.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Элазка А.И. Методики спектрального регулирования в реакторах с водой под давлением: дис. канд. техн. наук: 05.25.03. Науч. рук. Г.В. Тихомиров. НИЯУ МИФИ. Москва, 2021. 180 с. Режим доступа: <https://search.rsl.ru/ru/record/01011075129?ysclid=mbp6hqi9d3231737403> (дата обращения 17.02.2025).
Elazka A.I. Methods of spectral regulation in pressurized water reactors: dissertation of the Candidate of Technical Sciences: 05.25.03. Scientific supervisor G.V. Tikhomirov. National Research Nuclear University MEPHI. Moscow, 2021. 180 p. Available at: <https://search.rsl.ru/ru/record/01011075129?ysclid=mbp6hqi9d3231737403> (accessed: 17.02.2025).
2. Кавун О.Ю., Увакин М.А., Безруков Ю.А., Шарый Н.В. О применении метода сеток для нейтронно-физических 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: 19.02.2025).
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: 19.02.2025).
3. Куликов Г.Г., Куликов Е.Г., Шмелев А.Н., Апсэ В.А. Протактиний-231 – новый выгорающий поглотитель нейтронов. *Известия вузов: ядерная энергетика*. 2017;3:196–197. <https://doi.org/10.26583/npe.2017.3.18>
Kulikov G.G., Kulikov E.G., Shmelev A.N., Apse V.A. Protactinium-231 – a new burning-out neutron absorber. *Izvestiya vuzov: nuclear power engineering*. 2017;3:196–197. (In Russ.). <https://doi.org/10.26583/npe.2017.3.18>
4. Куликов Г.Г., Куликов Е.Г., Крючков Э.Ф., Шмелев А.Н. Повышение глубины выгорания топлива легководных реакторов при введении в его состав протактиния ²³¹Pa. *Ядерная физика и инжиниринг*. 2013;4(4):291–299. <https://doi.org/10.1134/S2079562913040088>
Kulikov G.G., Kulikov E.G., Kryuchkov E.F., Shmelev A.N. Increasing the burnout depth of light-water reactor fuel when protactinium ²³¹Pa is introduced into its composition. *Nuclear physics and engineering*. 2013;4(4):291–299. (In Russ.). <https://doi.org/10.1134/S2079562913040088>
5. Абу Сондос Махд Абдель Рахман Саламэх. Нейтронно-физические и радиационные характеристики ядерных реакторов типа ВВЭР в удлиненных кампаниях при использовании выгорающих поглотителей: дис. канд. техн. наук: 05.14.03. Науч. рук. В.М. Демин; НИЯУ МИФИ. Москва, 2019. 155 с. Режим доступа: https://ds.mephi.ru/documents/161/%D0%90%D0%B1%D1%83_%D0%A1%D0%BE%D0%BD%D0%B4%D0%BE%D1%81_%D0%9C_%D0%A2%D0%B5%D0%BA%D1%81%D1%82_%D0%B4%D0%B8%D1%81%D1%81%D0%B5%D1%80%D1%82%D0%B0%D1%86%D0%B8%D0%B8.pdf (дата обращения 17.02.2025).

⁸ Владимир Асмолов о развитии ВВЭР. – АТОМИНФО.RU: электронное период. изд. 2023. 16 ноября. – Режим доступа: <http://www.atominfo.ru/newsz06/a0961.htm> (дата обращения: 24.02.2025).

Abu Sondas Mahd Abdel Rahman Salame Neutron-physical and radiation characteristics of nuclear fuel of VVER type reactors in extended campaigns when using burn-out absorbers.: dissertation of the Candidate of Technical Sciences: 05.14.03. Scientific supervisor V.M. Demin; National Research Nuclear University MEPHI. Moscow, 2019. 155 p. (In Russ.). Available at: https://ds.mephi.ru/documents/161/%D0%90%D0%B1%D1%83_%D0%A1%D0%BE%D0%BD%D0%B4%D0%BE%D1%81_%D0%9C_%D0%A2%D0%B5%D0%BA%D1%81%D1%82_%D0%B4%D0%B8%D1%81%D1%81%D0%B5%D1%80%D1%82%D0%B0%D1%86%D0%B8%D0%B8.pdf (accessed: 17.02.2025).

6. Изотопы: свойства, получение, применение. Коллективная монография. Под ред. В.Ю. Баранова. Москва: ИздАТ, 2000. 704 с. Режим доступа: https://elib.biblioatom.ru/text/izotopy_2000/p0/ (дата обращения 19.02.2025).

Isotopes: properties, preparation, application. Collective monograph. Edited by V.Y. Baranov. Moscow: IzdAT, 2000. 704 p. (In Russ.). Available at: https://elib.biblioatom.ru/text/izotopy_2000/p0/ (accessed: 19.02.2025).

ВКЛАД АВТОРОВ:

Кускеев И.Ш. – проведение расчетов, визуализация, исследование;

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

Лебедева Е.А. – обзор и редактирование, исследование;

Столотнюк Я.Д. – редактирование, исследование.

AUTHORS' CONTRIBUTION:

Kuskeev I.Sh. – calculations, visualization, investigation;

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

Lebedeva E.A. – review & editing, investigation;

Stolotnyuk Ya.D. – review & editing, investigation.

ИСТОЧНИКИ ФИНАНСИРОВАНИЯ:

Работа выполнена без дополнительных источников финансирования.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ:

Конфликта интересов нет.

FUNDING:

No additional funding.

CONFLICT OF INTEREST:

No conflict of interest

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ:

Кускеев Искандер Шамилович, студент 4 курса, кафедры «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

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

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

e-mail: semishin@bmstu.ru

Лебедева Екатерина Александровна, студент 4 курса, кафедры «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

Столотнюк Ярослава Донатовна, 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: stolotnyard@bmstu.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS:

Iskander Sh. Kuskeev, 4th year student, Department of Nuclear Reactors and Installations, BMSTU, Moscow, Russian Federation.

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

e-mail: kuskeeviskander@gmail.com

Viktor V. Semishin, Senior lecturer, Department of Nuclear Reactors and Installations, BMSTU, Moscow, Russian Federation.

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

e-mail: semishin@bmstu.ru

Ekaterina A. Lebedeva, 4th year student, Department of Nuclear Reactors and Installations, BMSTU, Moscow, Russian Federation.

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

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

Yaroslava D. Stolotnyuk, Cand. Sci. (Engin), Associate Professor, Department of Nuclear Reactors and Installations, BMSTU, Moscow, Russian Federation.

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

e-mail: stolotnyard@bmstu.ru

Поступила в редакцию / Received 04.03.2025

После доработки / Revision 06.06.2025

Принята к публикации / Accepted 10.06.2025