

---

ЯДЕРНАЯ, РАДИАЦИОННАЯ И  
ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ  
NUCLEAR, RADIATION AND  
ENVIRONMENTAL SAFETY

---

УДК 621.039.5


<https://doi.org/10.26583/gns-2024-02-01>

EDN DROWGF

Оригинальная статья / Original paper



## О концепции обеспечения ядерной безопасности МТИР-СКД

А.С. Лапин  , В.Ю. Бландинский , В.А. Невиница,П.А. Фомиченко, Ю.Н. Волков 

НИЦ «Курчатовский институт», г. Москва, Российская Федерация

 [Lapin\\_AS@nrcki.ru](mailto:Lapin_AS@nrcki.ru)

**Аннотация.** Реактор МТИР-СКД является исследовательским реактором с легководным теплоносителем, имеющим в номинальном режиме работы быстрый спектр нейтронов. Совокупность данных особенностей не имеет ни один из действующих или проектируемых реакторов, поэтому выбору конструкции органов регулирования и их расположению должно уделяться особое внимание. В статье рассматриваются различные конструкции органов регулирования, характерные для разрабатываемого в настоящее время энергетического реактора ВВЭР-СКД, а также действующих исследовательских реакторов с жидкометаллическим теплоносителем, имеющих быстрый спектр нейтронов с учетом особенностей МТИР-СКД: семиплечная конструкция сборки СУЗ, а также пэл кольцевого типа. Для каждой из рассматриваемых конструкций проведены расчеты эффективности и определено, что наибольшей удельной эффективностью обладает конструкция органа регулирования с кольцевым типом пэл. Данная конструкция выбрана основной для реактора МТИР-СКД. Предложены критерии и проведена оптимизация размещения органов регулирования в активной зоне реактора с целью снижения неопределенности получения нейтронно-физических характеристик в центральном автономном петлевом канале и повышению плотности потока в нем. При оптимизации размещения регулирующих органов в исследовательском реакторе учитывалось их влияние на основные нейтронно-физические характеристики, а особенно на их распределение во время работы в номинальных условиях. Аварийная защита и компенсирующие стержни, которые компенсируют температурные и плотностные эффекты при выходе реактора на номинальный уровень мощности извлечены, поэтому их влияние на нейтронно-физические характеристики реактора и петлевого канала во время работы на мощности не существенны, а компенсирующие стержни находятся в активной зоне и выводятся по мере выгорания топлива, поэтому их влияние на пространственное распределение нейтронно-физических характеристик будет существенным. Для снижения этого влияния компенсаторы выгорания и автоматические регуляторы предложено вынести за пределы активной зоны в отражатель. Для различных состояний реактора произведена оценка эффективности ОР СУЗ. Показано, что в различных состояниях органы регулирования переводят реактор на требуемый уровень подкритичности, в соответствии с НП-009-17.

**Ключевые слова:** МТИР-СКД, сверхкритические параметры теплоносителя, исследовательский реактор, тестовый реактор, органы регулирования.

**Благодарность.** Авторы благодарят за идею исследования и критические замечания при доработке текста статьи Субботина Станислава Анатольевича, к.т.н., начальника отдела НИЦ «Курчатовский институт» и Седова Алексея Александровича, заместителя руководителя отделения НИЦ «Курчатовский институт»

**Для цитирования:** Лапин А.С., Бландинский В.Ю., Невиница В.А., Фомиченко П.А., Волков Ю.Н. О концепции обеспечения ядерной безопасности МТИР-СКД. *Глобальная ядерная безопасность*. 2024;14(2):5–19. <https://doi.org/10.26583/gns-2024-02-01>

**For citation:** Lapin A.S., Blandinsky V.Yu., Nevinitsa V.A., Fomichenko P.A., Volkov Yu.N. MTIR-SCP nuclear safety concept. *Global nuclear safety*. 2024;15(2):5–19 (In Russ.) <https://doi.org/10.26583/gns-2024-02-01>

## MTIR-SCP nuclear safety concept

**Anton S. Lapin**  , **Viktor Y. Blandinsky** , **Vladimir A. Nevinitsa**, **Pyotr A. Fomichenko**,  
**Yury N. Volkov** 

*NRC «Kurchatov Institute», Moscow, Russian Federation*

 [Lapin\\_AS@nrcki.ru](mailto:Lapin_AS@nrcki.ru)

**Abstract.** The MTIR-SCP reactor is a research reactor with a light-water coolant having a fast neutron spectrum in nominal operation. None of the existing or projected reactors has a set of these features, therefore, special attention should be paid to the choice of the design of control rods and their location. The article considers various designs of control rods characteristic of the VVER-SCP power reactor currently under development, as well as existing research reactors with a liquid metal coolant having a fast neutron spectrum, taking into account the features of the MTIR-SCP: a seven-element control rod assembly design, as well as a ring-type absorbing element. Efficiency calculations are carried out for each of the structures under consideration and it was determined that the design of a control rod with an annular type of absorbing element has the highest specific efficiency. This design is chosen as the main one for the MTIR-SCP reactor. Criteria are proposed and optimization of the placement of control rods in the reactor core is carried out in order to reduce the uncertainty of obtaining neutron-physical characteristics in the central autonomous loop channel and increase the flow density in it. When optimizing the placement of control rods in the research reactor, their influence on the main neutron-physical characteristics, and especially on their distribution during operation under nominal conditions, is taken into account. Emergency protection and compensating rods that compensate for temperature and density effects when the reactor reaches the nominal power level have been removed, therefore their effect on the neutron-physical characteristics of the reactor and the loop channel during operation at power is not significant, and the compensating rods are located in the core and are removed as the fuel burns out, therefore their effect on the spatial The distribution of neutron-physical characteristics will be significant. To reduce this effect, burnout compensators and automatic regulators are proposed to be moved outside the core into the reflector. For various reactor conditions, the efficiency of the control and protection system was evaluated. It is shown that in various states, the control rods transfer the reactor to the required level of subcriticality, in accordance with NP-009-17.

**Keywords:** MTIR-SCP, supercritical parameters of the coolant, research reactor, test reactor, regulatory authorities.

**Acknowledgment.** The authors would like to express their gratitude to Stanislav Anatolievich Subbotin, Cand. Sci. (Engin.), Head of Department of SRC «Kurchatov Institute» and Alexey Alexandrovich Sedov, Deputy Head of Department of SRC "Kurchatov Institute" for the idea of the study and critical comments during the revision of the text of the article.

---

### Введение

В настоящее время в НИЦ «Курчатовский институт» разрабатывается концепция ядерной энергетической установки на базе реактора ВВЭР-СКД [1]. В ходе проведенных работ определены задачи, требующие решения перед началом проектирования такого реактора. При создании инновационных ядерных энергетических установок возникает необходимость рассмотрения не только номинальных технологических процессов,

но и проектных и запроектных аварий, что не только усложняет и удорожает структуру и конструкцию, но и выдвигает проблему научного обоснования возможности решения нового класса научно-технических задач с привлечением новой экспериментальной базы и расчетного инструмента. При этом объем усилий, связанный с созданием и обоснованием систем безопасности становится соизмеримым с созданием систем нормальной эксплуатации. Анализ возмож-

ности использования отечественной экспериментальной базы для решения задач направления ВВЭР-СКД [2-4] показывает необходимость создания исследовательской ядерной установки (ИЯУ) МТИР-СКД [5].

Требованием, предъявляемым к ИЯУ МТИР-СКД является широкий исследовательский функционал. Конструкция реактора предусматривает размещение облучательных каналов как в активной зоне, так и вместо кассет сменного отражателя реактора. Кроме того, предполагается размещение двух автономных петлевых каналов в центре и на периферии активной зоны, в которых могут облучаться экспериментальные сборки с различными видами топлива и конструкционных материалов, с различной температурой входа легководного теплоносителя (от 250 до 450 °С) и, следовательно, с возможностью изменения его входной плотности (от 800 до 100 кг/м<sup>3</sup>, соответственно), обеспечивая изменение спектра нейтронов в экспериментальной ТВС от теплового до быстрого.

Важным элементом конструкции реактора являются исполнительные органы системы управления и защиты (СУЗ), целью которых является обеспечение безопасной эксплуатации реактора в различных режимах его работы, а также компенсация эффектов, связанных с изменением температур, плотности теплоносителя и изменения нуклидного состава в процессе выгорания.

МТИР-СКД, как и энергетический реактор ВВЭР-СКД, являются уникальными, поскольку охлаждаются легководным теплоносителем низкой плотности с применением

тесной решетки ТВЭлов, что обеспечивает быстрый спектр нейтронов в активной зоне в режиме нормальной эксплуатации. При этом при переходе реактора в состояние длительного останова, в активной зоне реализуется тепловой спектр нейтронов, что приводит к существенному изменению эффективности поглощения в органах регулирования СУЗ. Эту особенность необходимо учитывать при выборе эффективности ОР СУЗ

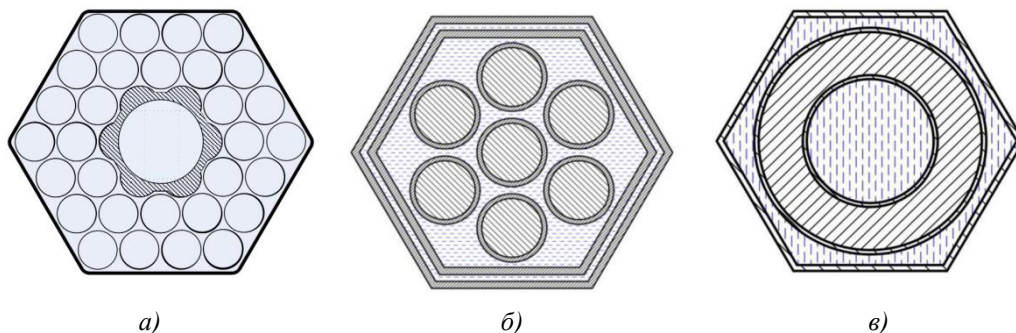
Поскольку МТИР-СКД – исследовательский реактор, то при выборе компоновки его активной зоны необходимо учитывать то, что в процессе эксплуатации возможно изменение количества ТВС за счет уменьшения или увеличения количества сборок отражателя. Кроме того, возможно изменение состава топлива, а также конструкции ТВС. При этом положение органов регулирования при различных изменениях компоновки активной зоны изменить трудно. Поэтому выбору их размещения с учетом различных условий эксплуатации МТИР-СКД должно уделяться большое внимание уже на стадии проектирования [6].

В данной статье изложены результаты расчетных исследований при выборе конструкции органов регулирования реактора и их размещении в активной зоне.

## 2 Методы

### 2.1 Рассмотренные конструкции органа регулирования

Были рассмотрены три конструкции органов регулирования для реактора МТИР СКД (рис. 1).



**Рисунок 1.** Рассмотренные конструкции органов регулирования реактора МТИР-СКД:

а) центральный канал в ТВС; б) поглощающая сборка; в) кольцевой поглощающий элемент

**Figure 1.** The considered designs of the MIR-SKD reactor control rods:

a) the central channel in the fuel assembly; б) the absorbing assembly; c) the annular absorbing element

Конструкция центрального канала в ТВС схожа с конструкцией канала под орган регулирования энергетического реактора ВВЭР-СКД. В данной конструкции в части ТВС на месте семи центральных твэлов размещается канал сложной формы, в котором расположен орган регулирования. Такая конструкция позволяет получить наиболее низкие градиенты энерговыделения в пределах ТВС.

Альтернативным способом размещения поглощающих элементов внутри реактора является использование поглощающей кассеты, в которой будут присутствовать только неделящиеся материалы, т.е. будет отсутствовать топливо. Такая кассета имеет такие же внешние размеры (размер под ключ – 5,94 см), как и ТВС активной зоны. Поглощающая сборка имеет чехол толщиной 1,5 мм. Внутри этого чехла расположена подвижная часть кассеты, имеющая шестигранную форму с размером под ключ 5,44 см. Подвижная часть окружена чехлом толщиной 1,5 мм. Между чехлом ТВС и чехлом подвижной части имеется зазор в 1 мм, заполненный теплоносителем. Внутри чехла расположены поглощающие элементы с относительным шагом размещения 1.16. Рассматривается вариант с размещением 7 поглощающих элементов в одной кассете. Каждый пэл имеет оболочку толщиной 1 мм.

Третий вариант конструкции – кольцевой поглощающий элемент, который имеет внешние размеры, такие же, как и ТВС активной зоны реактора. Внутренний радиус чехла ТВС составляет 30,5 мм. Поглощающий элемент имеет форму кольца, внутри и снаружи окруженный оболочкой толщиной 1 мм. Внутренний радиус пэла составляет 17 мм, внешний – 26,8 мм. Зазор между пэлом и чехлом сборки составляет 2 мм. Размеры кольца из карбида бора выбраны исходя из равенства объемов поглотителя с предыдущим вариантом из семи поглощающих элементов.

Во всех рассмотренных случаях в качестве поглотителя систем аварийной защиты и компенсации реактивности используется карбид бора с обогащением 80 %. В сборках автоматического регулятора используется

карбид бора с природным содержанием (19,8%).

## 2.2 Методика оптимизации размещения органов регулирования

С одной стороны, реактор МТИР-СКД является тестовым реактором для подтверждения основных положений, закладываемых при проектировании реактора ВВЭР-СКД, поэтому целесообразно иметь в активной зоне органы регулирования, конструкция которых схожа с ОР СУЗ энергетического реактора. С другой стороны МТИР-СКД – исследовательский реактор, а значит, конструкция органов регулирования должна позволять вносить изменения в компоновку активной зоны, а также учитывать особенности данного реактора.

В центре активной зоны предполагается размещение автономного петлевого канала. Основной задачей данного петлевого устройства является проведение облучения топливных и нетопливных материалов при различной температуре и различном спектре нейтронов, что будет достигаться подачей на вход в канал воды различной плотности, температуры и давления. Для достаточно быстрого набора необходимого флюенса необходимо иметь высокую плотность потока нейтронов внутри петлевого канала. Стоит учитывать, что размещение в непосредственной близости к каналу органов регулирования приведет к снижению плотности потока в петлевом устройстве, а также может приводить к высокой неопределенности прогнозирования и последующего моделирования нейтронно-физических характеристик в петлевом канале.

Необходимо учитывать, что в центральной части активной зоны, где плотность потока наибольшая, предполагается размещение ампульных и экспериментальных устройств. По этой причине необходимо, чтобы нейтронно-физические характеристики были стабильны во время микрокампаний и обеспечивали максимально возможную скорость набора флюенса нейтронов и повреждающей дозы. Стержни аварийной защиты и стержни, компенсирующие температурные и плотностные эффекты при выходе реактора на номинальный уровень мощно-

сти, полностью извлекаются из активной зоны и не оказывают существенного влияния на номинальные нейтронно-физические характеристики. С другой стороны, необходимо обеспечить высокую эффективность этих групп стержней, что может быть достигнуто за счет их размещения в центральной части активной зоны на некотором удалении от центрального петлевого канала.

Стержни, компенсирующие запас реактивности на выгорание, в начале микрокампании находятся в активной зоне и выводятся по мере выгорания топлива и падения реактивности, поэтому их влияние на распределение нейтронно-физических характеристик будет существенным. Это касается и автоматических регуляторов. Поэтому они должны располагаться на периферии активной зоны.

### 2.3 Используемые программные комплексы

Представленные в данной работе результаты расчетных исследований получены при использовании программного комплекса MCNP5<sup>1</sup> и библиотеки ядерных данных, сформированной на базе стандартных ENDF/B-VII.0 - файлов (Evaluated Nuclear Data File B-VII.0). Код MCNP-5 предназначен для совместного моделирования переноса различного вида частиц (нейтронов, фотонов, электронов). Неоднородные (а для нейтронов и однородные) уравнения переноса излучений решаются аналоговыми и неаналоговыми методами Монте-Карло с использованием нейтронных данных, содержащихся в библиотеках оцененных ядерных данных или полученных на их основе. Геометрический модуль позволяет описывать, практически без упрощений, любые системы в трехмерной геометрии. Это неоспоримое преимущество данного кода.

Расчет выгорания ядерного топлива проводился с помощью ПК ISTAR<sup>2</sup> – программ-

ной системы моделирования изотопной кинетики в реакторных расчетах с использованием прецизионного кода MCNP5. Задача кинетики нуклидного состава сводится к решению линейной системы обыкновенных дифференциальных уравнений первого порядка, матрица которой содержит вероятности все процессы для всех нуклидов. Необходимые параметры взаимодействия нуклидов с нейтронами и величины усредненных потоков нейтронов рассчитываются внешним кодом MCNP5, не входящими в ПК ISTAR.

## 3 Результаты

### 3.1 Выбор конструкции ОР СУЗ МТИР-СКД

Произведен выбор конструкции штатного органа регулирования реактора МТИР-СКД. Конструкция центрального поглощающего канала в ТВС является неоптимальной для исследовательского реактора, поскольку из-за малого размера «под ключ» ТВС реактора и наличия петлевых каналов, оснащенных системами компенсации давлений между основным и страховочным корпусом петлевого устройства и каналом для измерительной аппаратуры, а также наличием в активной зоне облучательных и ампульных устройств почти в 10% сборок размещение органов регулирования невозможно. По этой причине для обеспечения требуемого уровня подкритичности необходимо разместить органы регулирования такого типа практически во всех ТВС, где это конструктивно возможно. В результате не удастся получить достаточную область в центре активной зоны с постоянными нейтронно-физическими характеристиками, что приводит к большим неопределённостям при проведении экспериментов.

При использовании семипэльной конструкции и кольцевого поглощающего элемента особое внимание уделялось неравномерности энерговыделения в соседних с по-

<sup>1</sup> MCNP – A General Monte Carlo N-Particle Transport Code, Version 5. X-5 Monte Carlo Team. Los Alamos National Laboratory Report LA-UR-03-1987, 2003.

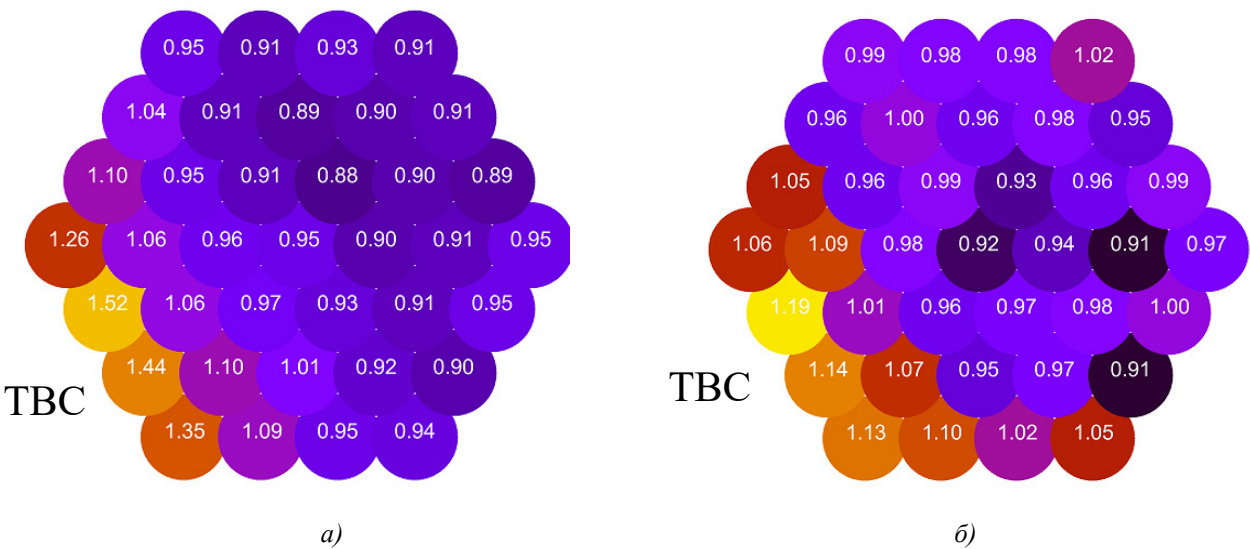
<sup>2</sup> Дудников А.А. Программа моделирования изотопной кинетики в многокомпонентных структурах

ядерной энергетики «ISTAR» / Свидетельство о государственной регистрации ПрЭВМ, рег. № 2020619218 от 13.08.2020. – Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?edn=chwohw> (дата обращения: 30.05.2024)



глошающей кассетой ТВС, поскольку при полностью выведенном поглотителе кассета на уровне активной зоны заполняется большим количеством теплоносителя с высокой плотностью, что приводит к затеплению спектра в прилегающих к каналу твэлах и росту энерговыделения в них, что в свою очередь приводит к существенному росту температуры топлива. Рост локального энерговыделения по сравнению со средним в активной зоне составляет более 60%. Для решения данной проблемы предложено разместить в поглощающих стержнях ниже уровня

поглотителя (карбида бора) полые цилиндрические стержни-вытеснители для сохранения доли теплоносителя даже при поднятых органах регулирования на номинальном уровне. Вытеснители являются продолжением органов регулирования, имеют такой же внешний диаметр. На рисунке 2 представлено относительное энерговыделение в твэлах ТВС, прилегающей к органу регулирования. В рассмотренном случае орган регулирования выведен из активной зоны. Относительные величины даны в сравнении со средним энерговыделением в активной зоне.



**Рисунок 2.** Относительное энерговыделение в твэлах соседней с органом регулирования ТВС:  
а) без вытеснителя; б) с наличием вытеснителя  
**Figure 2.** Relative energy release in fuel rods of a fuel assembly adjacent to the control rod:  
a) without a displacer; b) with the presence of a displacer

Произведено сравнение двух конструкций поглощающих сборок – семипэльной и кольцевой. Оценка максимальной мощности

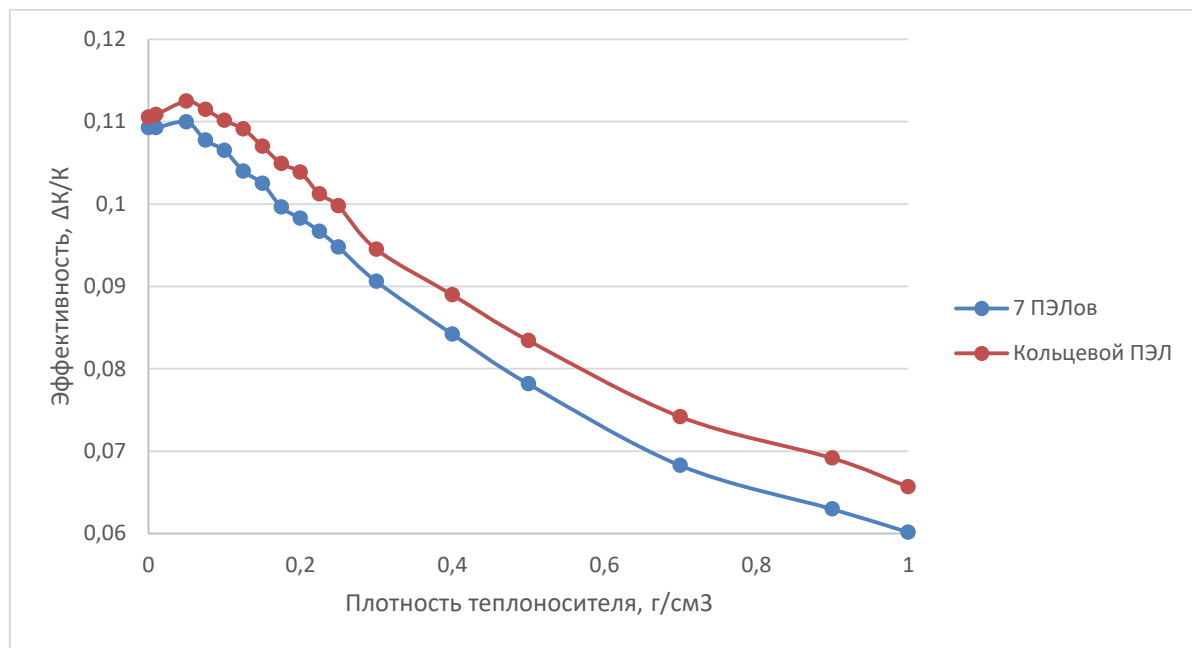
сборок для обоих вариантов представлена в таблице 1.

**Таблица 1.** Мощность поглощающей сборки  
**Table 1.** The power of the absorbing assembly

	Максимальная мощность, кВт	Объем поглотителя, л	Энергонапряженность, кВт/л
Семи пэльный ОР СУЗ	54,3	0,98	54,8
Кольцевой ОР СУЗ	57,8	0,98	58,4

Произведен расчет эффективности органов регулирования реактора МТИР-СКД с кольцевыми органами регулирования и произведено сравнение с семипэльной кон-

струкцией. Значения эффективности органов регулирования в зависимости от плотности теплоносителя приведены на рисунке 3.



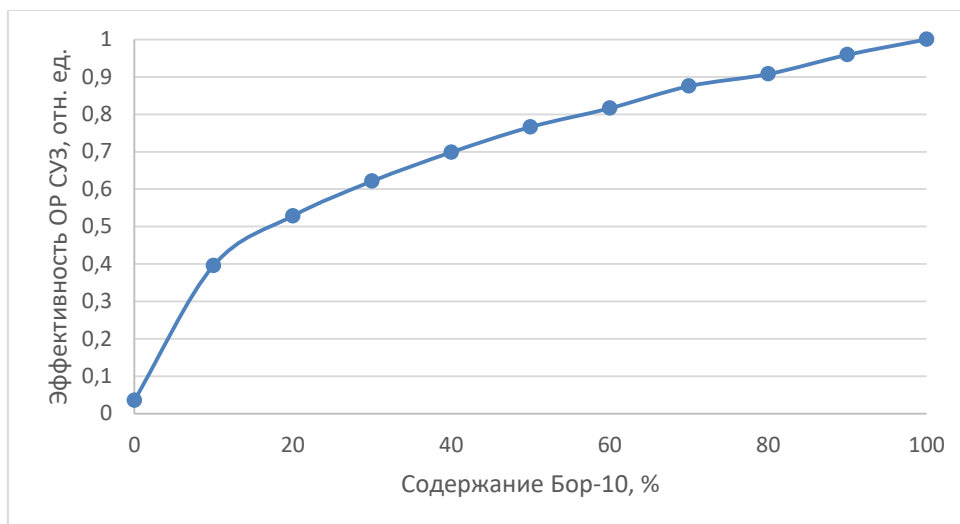
**Рисунок 3.** Эффективность органов регулирования с семипэльной и кольцевой конструкциями  
**Figure 3.** Efficiency of regulatory bodies with seven-element and ring structures

Как видно из полученных результатов, при равенстве объемов карбида бора эффективность в быстрой области при плотности теплоносителя  $< 0,1 \text{ г/см}^3$  отличается менее чем на 1%. Для рабочих плотностей теплоносителя отличия составляют порядка 4%. Наибольшее увеличение отличия эффективности наблюдается для состояния с плотностью теплоносителя  $1 \text{ г/см}^3$ , которое составляет 9,5 %. Также стоит отметить, что для варианта с кольцевым поглощающим элементом возможно дальнейшее увеличение эффективности при выбранном обогащении бора. Возможно размещение цилиндрического пэла во внутреннюю полость кольцевого поглощающего элемента, что увеличит загрузку поглощающего материала.

Из-за невысокого сечения поглощения нейтронов в естественном боре (содержание  $^{10}\text{B} \sim 19,8\%$ ) в «жестком» спектре нейтронов приходится использовать высокообогащенный по изотопу  $^{10}\text{B}$  карбид бора. Высокообогащенный бор дорогой продукт и массово не производится в России. Высокая

удельная загрузка изотопа  $^{10}\text{B}$  ведет к существенным локальным неравномерностям нейтронно-физических характеристик в активной зоне и поглотителе, а также к термомеханическим нагрузкам (высокое удельное энерговыделение, распухание, газообразование). Однако даже применение высокообогащенного бора не обеспечивает высокой эффективности РО СУЗ, а увеличение их числа существенно ухудшает физические и экономические параметры исследовательского реактора. Для повышения экономичности (увеличение продолжительности микрокампании, глубины выгорания ЯТ и эффективности использования  $\text{B}_4\text{C}$ ) и безопасности реакторов с быстрым спектром необходимо увеличение эффективности РО СУЗ.

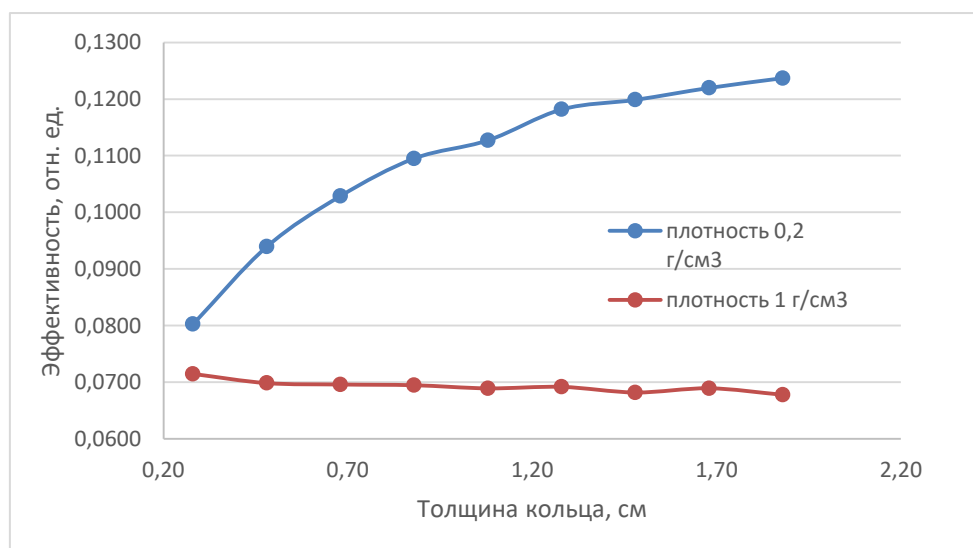
В качестве одного из вариантов было рассмотрено использование  $\text{B}_4\text{C}$  не с высоким, а с повышенным обогащением по изотопу  $^{10}\text{B}$ . На рисунке 4 приведена зависимость относительной эффективности РО СУЗ для реактора МТИР-СКД от величины обогащения бора по изотопу  $^{10}\text{B}$ .



**Рисунок 4.** Эффективность РО СУЗ в зависимости от обогащения бора по  $^{10}\text{B}$   
**Figure 4.** The efficiency of the RO control rods depends on the enrichment of boron by  $^{10}\text{B}$

Из рисунка видно, что возможность повышения эффективности за счет увеличения обогащения по  $^{10}\text{B}$  ограничена. Кроме того, дальнейшее (выше 80%) повышение обогащения существенно повышает его стоимость. Можно повысить эффективность органа регулирования за счет увеличения загрузки поглотителя в РО СУЗ. Наиболее приемлемой для этого является конструкция органа регулирования кольцевого типа. Уве-

личение эффективности в диапазоне рабочих температур и плотностей теплоносителя можно добиться путем увеличения толщины поглощающего кольца из карбида бора. Для понимания зависимости эффективности органа регулирования от толщины поглотителя и оценки влияния экранировки произведена серия расчетов, результаты которых представлены на рисунке 5.



**Рисунок 5.** Эффективность органов регулирования при различной толщине кольцевого поглотителя ( $\text{B}_4\text{C}$ )  
**Figure 5.** The effectiveness of control rods with different thickness of the annular absorber ( $\text{B}_4\text{C}$ )

Исходя из приведенных выше зависимостей можно сделать вывод, что повышения эффективности можно достичь путем увели-

чения толщины кольца или же при размещении в центре кольцевого поглотителя поглощающего стержня из карбида бора.

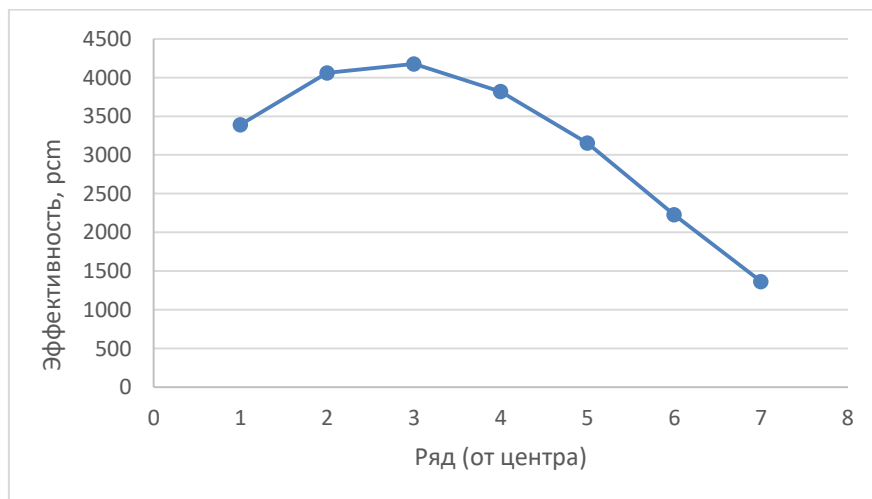


Для всех дальнейших расчетов выбрана толщина кольцевого поглотителя, равная 17,6 мм, что соответствует объему карбида бора для семипзельного поглотителя. В случае необходимости увеличения эффективности ОР СУЗ возможно увеличение толщины кольца.

### 3.2 Оптимизация размещения ОР СУЗ

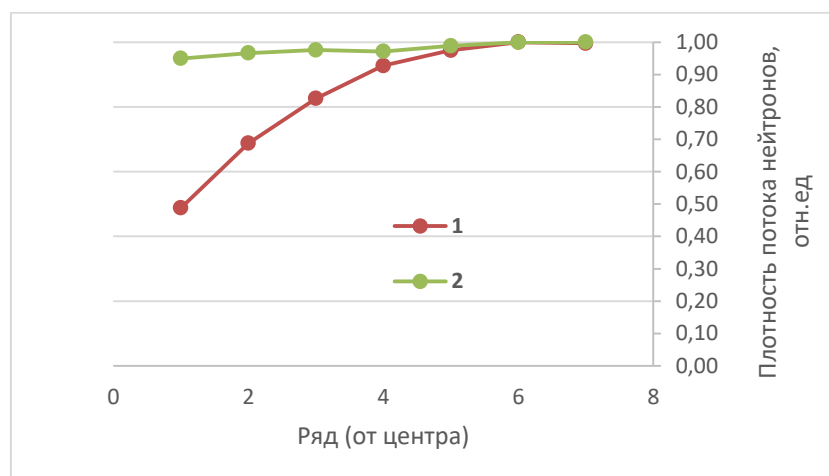
Для определения оптимального положения стержней аварийной защиты проведена серия расчетов по различному размещению ОР СУЗ в активной зоне. Под оптимальным положением понимается картограмма, при которой достигается наибольшая плотность потока нейтронов в центральном петлевом

канале и максимальная эффективность органов аварийной защиты. В связи с тем, что в центральном канале могут находиться как топливные, так и не топливные материалы, то эффективность аварийной защиты от этого может меняться. Рассмотрен вариант, когда в центральном канале расположена сборка со стальными стержнями. Произведен расчет эффективности трех органов регулирования с содержанием изотопа В<sup>10</sup> 80 % в различных положениях симметрично центра (рис. 6), а также нормированной на максимальное значение плотности потока нейтронов на оболочке стального стержня в центральном канале (рис. 7).



**Рисунок 6.** Эффективность трех органов регулирования при различном расположении в активной зоне

**Figure 6.** The effectiveness of the three control rods at different locations in the core



**Рисунок 7.** Плотность потока нейтронов в центральном петлевом канале: 1 – при опущенных органах регулирования; 2 – при поднятых органах регулирования

**Figure 7.** Neutron flux density in the central loop channel: 1 – with lowered control rods; 2 – with raised control rods

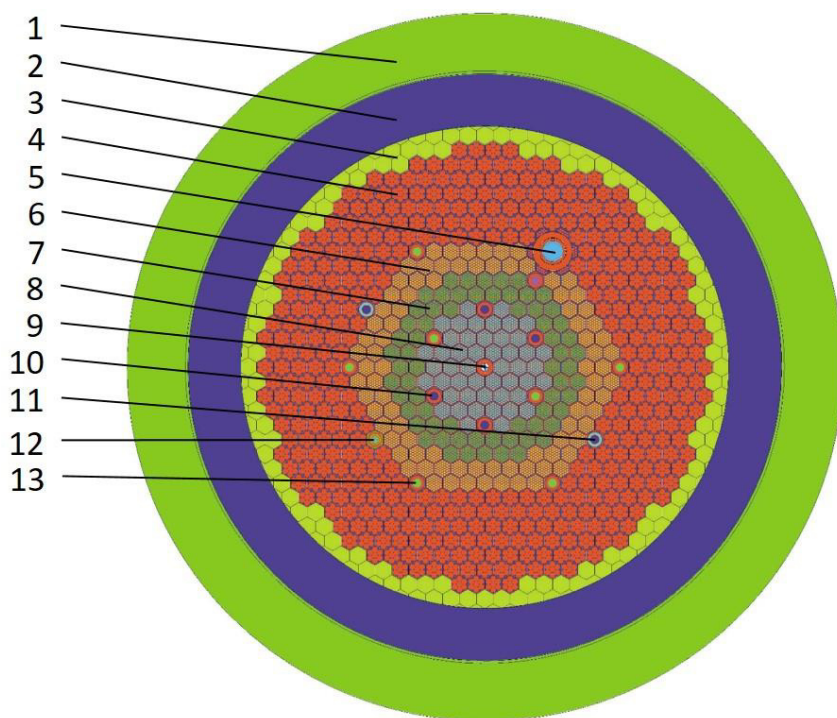
Как видно из полученных результатов, при размещении органов регулирования аварийной защиты в непосредственной близости к центральному каналу, в котором размещены нетопливные материалы их эффективность значительно ниже, чем при размещении в небольшом удалении. Сильное снижение эффективности происходит и при размещении органов регулирования на границе активной зоны. Поэтому с точки зрения максимальной эффективности наилучшим вариантом является размещения аварийной защиты в 4 ряду от центрального канала.

С точки зрения плотности потока нейтронов в центральном канале нужно отметить, что при опущенных стержнях аварийной защиты нет необходимости иметь высокие

значения плотности потока нейтронов. При поднятых стержнях существенного влияния на плотность потока они не оказывают.

Таким образом, стержни аварийной защиты и компенсаторы температурных и плотностных эффектов, т.е. те, которые при работе реактора на номинальном уровне мощности выведены из активной зоны, целесообразно разместить в 4 ряду от центрального канала.

Исходя из полученных результатов и основных требований, предъявляемым к органам регулирования МТИР-СКД, а также предъявляемым к исследовательским реакторам в целом, предложена картограмма размещения органов регулирования (рис. 8).



**Рисунок 8.** Картограмма реактора: 1 – Корпус реактора; 2 – Теплоноситель в опускающем участке; 3 – Шахта и выгородка; 4 – Кассеты заменяемого отражателя; 5 – ОУ периферийной автономной петли; 6 – ТВС зоны большого содержания плутония; 7 – ТВС зоны среднего содержания плутония; 8 – ТВС зоны малого содержания плутония; 9 – ОУ центральной автономной петли; 10 – Каналы стержней аварийной защиты; 11 – Кассеты со стержнями автоматического регулирования; 12 – Ампульное устройство; 13 – Кассеты с компенсирующими стержнями

**Figure 8.** Reactor cartogram: 1 – Reactor vessel; 2 – Coolant in the lowering section; 3 – Shaft and enclosure; 4 – Cartridges of the replaceable reflector; 5 – Peripheral autonomous loop; 6 – Fuel assemblies of the zone of high plutonium content; 7 – Fuel assemblies of the zone of medium plutonium content; 8 – Fuel assemblies of the zone of low plutonium content; 9 – Central autonomous loop; 10 – Channels of emergency protection rods; 11 – Cartridges with automatic control rods; 12 – Ampoule device; 13 – Cartridges with compensating rods

### 3.2 Эффективность ОР СУЗ

В соответствии с «Правилами ядерной безопасности исследовательских реакторов» (НП-009-17) используемые в реакторе решения должны обеспечивать:

- подкритичность реактора после взвода РО АЗ - не менее 1% ( $K_{эфф} \leq 0,99$ ) на любой момент кампании реактора;
- подкритичность реактора при введенных всех РО СУЗ - не менее 2% ( $K_{эфф} \leq 0,98$ ) на любой момент кампании реактора;
- подкритичность реактора в режиме длительного останова (при введенных всех РО СУЗ и использовании других технических средств воздействия на реактивность или частичной выгрузки ядерного топлива из активной зоны) – не менее 5% ( $K_{эфф} \leq 0,95$ ).

Кроме этого, эффективность РО АЗ без учета одного наиболее эффективного РО АЗ (группы РО АЗ) и их быстроедействие должны обеспечивать:

– приведение реактора в подкритическое состояние и поддержание его в этом состоянии в течение времени, достаточного для введения (срабатывания) других более медленных РО СУЗ.

Поскольку органы регулирования должны переводить реактор на определенный уровень подкритичности в любом состоянии, рассмотрены следующие возможные варианты различных плотностей теплоносителя и температур:

Состояние 1 – Номинальные значения температуры топлива, теплоносителя и конструкционных материалов; номинальные значения плотности теплоносителя;

Состояние 2 – Температура всех материалов 700 К, плотность теплоносителя соответствует номинальному режиму работы;

Состояние 3 – Плотность теплоносителя 1 г/см<sup>3</sup>, температура всех материалов 300 К.

Произведен расчет эффектов реактивности на начало микрокампании, которые должны быть скомпенсированы органами регулирования СУЗ (табл. 2).

**Таблица 2. Эффекты реактивности**

**Table 2. Reactivity effects**

Название эффекта	Значение эффекта, pcm
Плотностной эффект	-1333
Температурный эффект	2065
Суммарный плотностной и температурный эффекты	929
Запас критичности на выгорание	991

Таким образом, плотностной эффект имеет отрицательный знак, а температурный эффект – положительный. Суммарный эффект положительный и составляет 929 pcm.

Оценен вес различных групп стержней для различных состояний реактора (табл. 3).

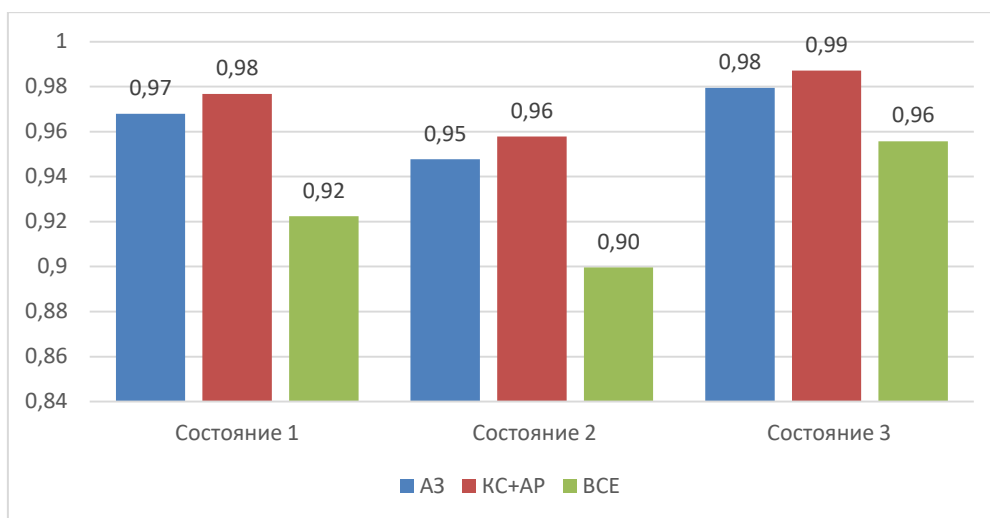
**Таблица 3. Эффективность органов регулирования по группам, pcm**

**Table 3. Effectiveness of control rods by groups, pcm**

	Состояние 1	Состояние 2	Состояние 3
АР	315	93	296
КС температурный	2676	1350	2743
КС выгорание	1293	403	1256
АЗ	5303	2652	5446
АР+КС	4375	1908	4428
АР+КС+АЗ	10405	4982	10629

Выбранное количество органов регулирования по группам позволяет переводить реактор на требуемый согласно НП-009-17

уровень подкритичности в любом состоянии (рис. 9).



**Рисунок 9.** Значения  $K_{eff}$  для различных состояний реактора при введенных органах регулирования  
**Figure 9.**  $K_{eff}$  values for various reactor states with introduced control rods

Как видно из полученных значений подкритичности, все требования, предъявляемые к органам регулирования выполняются. Стержни аварийной защиты без одного самого эффективного переводят реактор в подкритическое состояние. Компенсирующие ОР СУЗ компенсируют температурный и плотностной эффекты в любом состоянии реактора и вместе со стержнями АР переводят реактор в подкритическое состояние на уровень  $K < 0,99$ .

Как отмечалось ранее, эффективность ОР СУЗ кольцевого типа может быть повышена путем размещения дополнительного поглотителя внутри ПЭЛ.

#### 4 Обеспечение ядерной безопасности в аварийных процессах

Система управления аварийной защитой является стандартной для современных АС с РУ ВВЭР, также она используется для управления реактором в режимах нормальной эксплуатации, поэтому её применение целесообразно и для ИЯУ МТИР-СКД. На последующих стадиях проектирования необходимо определить конструктивные и количественные характеристики системы, с учётом выбранных режимов функционирования и степени резервирования с участием разработчика реакторной установки.

В частности, система аварийного ввода поглотителя (бора) необходимой концентрации обеспечивает резервирование системы управления аварийной защиты. Использование этой системы приведет к удорожанию блока. Однако отсутствие в проекте системы аварийного ввода поглотителя может негативно сказаться на безопасности и требует расчётного обоснования на последующих стадиях проектирования.

В случае наличия системы аварийного ввода бора потребуется предусмотреть систему его вывода из теплоносителя после завершения аварийного процесса. Возможными вариантами являются:

- система очистки, которая снизит его концентрацию до минимально возможного уровня, позволяющего перевести реактор в режим нормальной эксплуатации. Минусом такого варианта является значительная длительность процесса вывода бора из теплоносителя и необходимость проведения расчётного обоснования значения минимальной концентрации бора в теплоносителе для нормальной работы реактора на всех этапах топливной компании.

- слив теплоносителя первого контура с бором после аварии в специально предусмотренную емкость для последующей его очистки, отмывка первого контура и ТВС от

бора, залив теплоносителя с необходимым ВХР. Минусом такого варианта является необходимость предусматривать специальные баки хранения теплоносителя с бором большой емкости, которые во время эксплуатации могут так и не использоваться.

В случае применения в проекте МТИР-СКД системы аварийного ввода бора применение данной систем потребует определить конструктивные и количественные характеристики системы, с учётом выбранных режимов функционирования и степени резервирования. Также предлагается рассмотреть возможность применения системы аварийного ввода поглотителя, построенной на пассивном принципе функционирования.

### Заключение

Важным элементом, определяющим исследовательский потенциал ИЯУ МТИР-СКД являются органы регулирования СУЗ. Рассмотрены три различные конструкции ОР СУЗ: цилиндрический пэл в центральном канале ТВС, семипэльная сборка и сборка с кольцевым пэл. Исходя из требований, которые сформулированы для МТИР-СКД, оптимальным и обладающим наибольшей удельной эффективностью является пэл кольцевой конструкции. В случае изменения компоновки активной зоны и необходимости повышения эффективности системы управления и защиты его конструкция позволяет разместить дополнительное количество поглотителя в центральную полость кольцевого поглотителя.

Проведена оптимизация размещения органов регулирования СУЗ. Поскольку в МТИР-СКД предполагается размещение центрального петлевого канала, то целесообразно вынести ОР СУЗ из центральной части для увеличения плотности потока нейтронов в ней и снижения возмущений нейтронного поля при проведении облучений.

Как видно из полученных значений эффективности ОР СУЗ, для различных состояний реактора выполняются все требования, предъявляемые к органам регулирования. Стержни аварийной защиты без одного самого эффективного переводят реактор в подкритическое состояние. Компенсирующие ОР СУЗ компенсируют температурный и плотностной эффекты в любом состоянии реактора и вместе со стержнями АР переводят реактор в подкритическое состояние на уровень  $K < 0,99$ , согласно НП-009-17.

Система управления аварийной защитой является стандартной для современных АЭС с РУ ВВЭР и должна использоваться на ИЯУ МТИР-СКД. Система аварийного ввода бора необходима для обеспечения ядерной безопасности реактора в аварийных процессах. После аварии бор должен быть удален из теплоносителя либо с помощью системы очистки, либо путем слива охлаждающей жидкости в емкость для очистки. Конструкция и характеристики системы должны быть определены с учетом режимов работы и степени резервирования.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Алексеев П.Н., Ковалишин А.А., Седов А.А., Андрианова Е.А. [и др.]. Развитие технологии ВВЭР на базе энергетических реакторов с легководным теплоносителем сверхкритических параметров. *Вопросы атомной науки и техники. Серия: Физика ядерных реакторов*. 2023;1:48–63. EDN: EXYEZU. Режим доступа: <http://nrcki.ru/files/pdf/VANT-2023-01.pdf> (дата обращения: 30.05.24)

Alekseev P.N., Kovalishin A.A., Sedov A.A., Andrianova E.A. [et al]. Development of VVER technology based on power reactors with a light-water coolant of supercritical parameters. *Issues of atomic science and technology. Series: Physics of Nuclear Reactors*. 2023;1:48–63. EDN: EXYEZU. Available at: <http://nrcki.ru/files/pdf/VANT-2023-01.pdf> (accessed: 30.05.24)

2. Внуков Р.А., Котов Я.А., Невиница В.А., Колесов В.В. [и др.]. Оценка возможности получения экспериментальных данных для зон ВВЭР-СКД на стенде БФС. *ВАНТ. Сер. Ядерно-реакторные конструкции*. 2023;1:117–129. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=50474933> (дата обращения: 30.05.24)



Vnukov R.A., Kotov Ya.A., Nevinitisa V.A., Kolesov V.V., [et al]. Evaluation of the possibility of obtaining experimental data for VVER-SKD zones at the BFS stand. *VENT. Ser. Nuclear Reactor Constants*. 2023;1:117–129. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=50474933> (accessed: 30.05.24)

3. Седов А.А., Поляков П.С., Пустовалов С.Б., Паршин В.В., Симонов С.С. Основные результаты тестовых испытаний замкнутого контура с естественной циркуляцией легководного теплоносителя при сверхкритическом давлении. *Теплоэнергетика*. 2023;3:73–86. <https://doi.org/10.56304/S0040363623030074>

Sedov A.A., Polyakov P.S., Pustovalov S.B., Parshin V.V., Simonov S.S. The main results of test tests of a closed circuit with natural circulation of a light-water coolant at supercritical pressure. *Thermal Power Engineering*. 2023;3:73–86. <https://doi.org/10.56304/S0040363623030074>

4. Бландинский В.Ю., Колесов В.В., Невиница В.А., Фомиченко П.А. [и др.]. Особенности изменения изотопного состава опытных твэлов реактора типа ВВЭР-СКД при последовательном облучении в быстром и тепловом спектре нейтронов. *ВАНТ. Сер. Физика ядерных реакторов*. 2022;2:90–96. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=50487323> (дата обращения: 30.05.24)

Blandinsky V.Yu., Kolesov V.V., Nevinitisa V.A., Fomichenko P.A. [et al]. peculiarities of changes in the isotopic composition of pilot fuel elements of a VVER-SKD reactor under successive irradiation in the fast and thermal neutron spectrum. *Issues of atomic science and technology. Series: Physics of Nuclear Reactors*. 2022;2:90–96. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=50487323> (accessed: 30.05.24)

5. Седов А.А., Бландинский В.Ю., Котов Я.А., Кузенкова Д.С., [и др.]. Концепция ядерной энергетической установки на базе многоцелевого тестового исследовательского реактора малой мощности с легководным теплоносителем сверхкритических параметров. *Теплоэнергетика*. 2023;5:5–22. EDN: GMHDNA. <https://doi.org/10.56304/S0040363623050065>

Sedov A.A., Blandinsky V.Yu., Kotov Ya.A., Kuzenkova D.S. [et al]. The concept of a nuclear power plant based on a multipurpose test research reactor of small capacities with a light-water coolant of supercritical parameters. *Thermal Power Engineering*. 2023;5:5–22. EDN: GMHDNA. <https://doi.org/10.56304/S0040363623050065>

6. Жемков И.Ю. Оптимизация размещения органов СУЗ в исследовательском реакторе на быстрых нейтронах. *Сборник трудов АО ГНЦ НИИАР*. 2010;1:27–34. EDN YRPSFF. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=29319756> (дата обращения: 30.05.24)

Zhemkov I.Yu. Optimization of the placement of CPS organs in a fast neutron research reactor. *Proceedings of JSC SSC NIIAR*. 2010;1:27–34. EDN YRPSFF. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=29319756> (accessed: 30.05.24)

#### ВКЛАД АВТОРОВ:

**Лапин А.С.** – проведение численных расчетов, подготовка текста статьи

**Бландинский В.Ю.** – постановка задачи, выбор методов исследования

**Невиница В.А.** – выбор методов исследования

**Фомиченко П.А.** – общее руководство, выбор методов исследования

**Волков Ю.Н.** – подготовка текста статьи

#### AUTHORS' CONTRIBUTION:

**Lapin A.S.** – numerical calculations, preparation of the text of the article

**Blandinsky V.Yu.** – problem statement, choice of research methods

**Nevinitisa V.A.** – the choice of research methods

**Fomichenko P.A.** – general guidance, selection of research methods

**Volkov Yu.N.** – general guidance, preparation of the text of the article

#### ИСТОЧНИКИ ФИНАНСИРОВАНИЯ:

Работа выполнена при финансовой поддержке АО «Концерн Росэнергоатом»

#### FUNDING:

The work was carried out with the financial support of Rosenergoatom Concern JSC

#### КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ:

Конфликта интересов нет.

#### CONFLICT OF INTEREST:

No conflict of interest.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ:

**Антон Сергеевич Лапин**, лаборант-исследователь, НИЦ «Курчатовский институт», г. Москва, Российская Федерация.

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

e-mail: Lapin\_AS@nrcki.ru

**Виктор Юрьевич Бландинский**, кандидат технических наук, ученый секретарь НИЦ «Курчатовский институт», г. Москва, Российская Федерация.

ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-9667-1000>

e-mail: Blandinskiy\_VY@nrcki.ru

**Владимир Анатольевич Невиница**, кандидат технических наук, руководитель отделения, г. Москва, Российская Федерация.

e-mail: Neviniza\_VA@nrcki.ru

**Петр Анатольевич Фомиченко**, заместитель руководителя комплекса, НИЦ «Курчатовский институт», г. Москва, Российская Федерация.

e-mail: Fomichenko\_PA@nrcki.ru

**Юрий Николаевич Волков**, кандидат технических наук, ведущий эксперт, НИЦ «Курчатовский институт», г. Москва, Российская Федерация.

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

e-mail: YNVolkov@mephi.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS:

**Anton S. Lapin**, research assistant, NRC «Kurchatov Institute», Moscow, Russian Federation.

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

e-mail: Lapin\_AS@nrcki.ru

**Viktor Yu. Blandinsky**, Cand. Sci. (Engin.), Scientific Secretary, NRC «Kurchatov Institute», Moscow, Russian Federation.

ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-9667-1000>

e-mail: Blandinskiy\_VY@nrcki.ru

**Vladimir A. Nevinitza**, Cand. Sci. (Engin.), Head of the Department, NRC «Kurchatov Institute», Moscow, Russian Federation.

e-mail: Neviniza\_VA@nrcki.ru

**Pyotr A. Fomichenko**, Deputy Head of the complex, NRC «Kurchatov Institute», Moscow, Russian Federation.

e-mail: Fomichenko\_PA@nrcki.ru

**Yury N. Volkov**, Cand. Sci. (Engin.), Leading expert, NRC «Kurchatov Institute», Moscow, Russian Federation.

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

e-mail: YNVolkov@mephi.ru

Поступила в редакцию 15.04.2024

После доработки 31.05.2024

Принята к публикации 06.06.2024

Received 15.04.2024

Revision 31.05.2024

Accepted 06.06.2024