

МРНТИ 29.15.39

<https://doi.org/10.26577/RCPH98320267>

А.Ч. Ашибаев^{1*}, Ж.Т. Бугыбай¹, К.С. Киселёв¹, А.М. Аханов¹,
С.К. Аскербек^{1,2}, Е.В. Чихрай^{1,2}, А.А. Шаймерденов¹

¹Институт ядерной физики, Алматы, Казахстан

²Казахский Национальный Университет имени аль-Фараби, Алматы, Казахстан

*e-mail: arystanashibayev29@gmail.com

ОБЛУЧЕНИЕ Be₁₂Cr В РЕАКТОРНЫХ УСЛОВИЯХ ПРИ ЗАДАННЫХ ТЕМПЕРАТУРНО-ДОЗОВЫХ РЕЖИМАХ

Исследование посвящено изучению свойств бериллида хрома (Be₁₂Cr) – перспективного материала-размножителя нейтронов для бланкетов будущих термоядерных реакторов. Как известно, эксплуатация материалов бланкета термоядерного реактора характеризуется высокой температурой и радиационным излучением, поэтому одно из требований к материалам бланкета – их радиационная стойкость. Актуальность работы обусловлена необходимостью проведения реакторных испытаний образцов Be₁₂Cr, изготовленных методом горячего вакуумного прессования. Цель исследования – расчётное обоснование безопасности и определение температурно-дозовых режимов облучения в реакторе ВВР-К. Методология исследования основана на сопряжённом численном моделировании: нейтронно-физическом анализе методом Монте-Карло в MCNP 6 и теплофизических расчётах методами вычислительной гидродинамики в ANSYS Fluent 2024 R1.

В результате получены детальные распределения нейтронных потоков, полей энерговыделения и температур. Установлено, что за 6 циклов облучения накопленная доза достигает 0,14 СнА. Теплофизический анализ показал, что при изменении давления гелия в диапазоне 10–101325 Па среднеобъёмная температура образцов варьируется в интервалах 157–428 °С для нижнего и 135–499 °С для верхнего расположений соответственно. При анализе данных обнаружен эффект температурной инверсии: при давлении 10 Па температура верхних образцов на 71 °С выше температуры нижних ввиду изменения характера теплообмена в системе. Научная ценность исследования заключается в получении первого комплекса расчётных данных для специально разработанного облучательного устройства, предназначенного для реакторного облучения образцов бериллида хрома. Практическая значимость работы состоит в создании верифицированного инструмента для предиктивного анализа и планирования долгосрочных реакторных испытаний образцов Be₁₂Cr, что обеспечит соблюдение пределов теплофизической безопасности эксперимента в условиях реактора ВВР-К при заданных температурно-дозовых режимах.

Ключевые слова: исследовательский реактор ВВР-К, бериллид хрома (Be₁₂Cr), облучательное устройство, тепловой режим, дозовый режим, температурная инверсия.

А.Ч. Ашибаев^{1*}, Ж.Т. Бұғыбай¹, К.С. Киселёв¹, А.М. Аханов¹,
С.Қ. Әскербек^{1,2}, Е.В. Чихрай^{1,2}, А.А. Шаймерденов¹

¹Ядролық физика институты, Алматы, Қазақстан

²Әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті, Алматы, Қазақстан

*e-mail: arystanashibayev29@gmail.com

Берілген температуралық-дозалық режимдерде реактор жағдайында Be₁₂Cr сәулелендіруі

Жұмыс болашақ термоядролық реакторлардың бланкеттеріне арналған келешекті нейтрон көбейткіш материалы – хром бериллидінің (Be₁₂Cr) қасиеттерін зерттеуге арналған.

Белгілі болғандай, термоядролық реактор бланкеті материалдарының пайдаланылуы жоғары температурамен және радиациялық сәулеленумен сипатталады, сондықтан бланкет материалдарына қойылатын талаптардың бірі – олардың радиациялық төзімділігі. Жұмыстың өзектілігі ыстық вакуумдық престеу әдісімен дайындалған Be_{12}Cr үлгілеріне реакторлық сынақтар жүргізу қажеттілігімен байланысты. Зерттеудің мақсаты – ССР-Қ реакторындағы сәулеленудің температуралық-дозалық режимдерін анықтау және қауіпсіздікті есептік негіздеу. Зерттеу әдістемесі MCNP 6 бағдарламасындағы Монте-Карло әдісімен нейтрондық-физикалық талдауға және ANSYS Fluent 2024 R1 бағдарламасындағы есептеу гидродинамикасы әдістерімен жылу-физикалық есептеулерге негізделген түйіндес сандық модельдеуге сүйенеді.

Нәтижесінде нейтрон ағындарының, энергия бөліну өрістерінің және температураның егжей-тегжейлі таралуы алынды. 6 сәулелену циклі ішінде жинақталған дозаның 0,14 dpa жеткені анықталды. Жылу-физикалық талдау гелий қысымы 10–101325 Па диапазонында өзгерген кезде үлгілердің орташа көлемдік температурасы төменгі орналасу үшін 157–428 °C, ал жоғарғы орналасу үшін 135–499 °C аралығында өзгеретінін көрсетті. Деректерді талдау барысында температуралық инверсия әсері анықталды: 10 Па қысымда жүйедегі жылу алмасу сипатының өзгеруіне байланысты жоғарғы үлгілердің температурасы төменгі үлгілерге қарағанда 71 °C-қа жоғары болды. Зерттеудің ғылыми құндылығы хром бериллиді үлгілерін реакторлық сәулелендіруге арналған арнайы әзірленген сәулелендіру құрылғысы үшін есептік деректердің алғашқы кешенін алуда жатыр. Жұмыстың практикалық маңыздылығы Be_{12}Cr үлгілерінің ұзақ мерзімді реакторлық сынақтарын болжамды талдау және жоспарлау үшін верификацияланған құралды жасаудан тұрады, бұл ССР-Қ реакторы жағдайында берілген температуралық-дозалық режимдерде эксперименттің жылу-физикалық қауіпсіздік шектерінің сақталуын қамтамасыз етеді.

Түйін сөздер: ССР-Қ зерттеу реакторы, хром бериллиді (Be_{12}Cr), сәулелендіру құрылғысы, жылу режимі, доза режимі, температуралық инверсия.

A.Ch. Ashibayev^{1*}, Zh.T. Bugybay¹, K.S. Kisselyov¹, A.M. Akhanov¹,
S.K. Askerbekov^{1,2}, Ye.V. Chikhray^{1,2}, A.A. Shaimerdenov¹

¹Institute of Nuclear Physics, Almaty, Kazakhstan

²Farabi University, Almaty, Kazakhstan

*e-mail: arystanashibayev29@gmail.com

Irradiation of Be_{12}Cr under reactor conditions at specified temperature-dose regimes

This work is dedicated to studying the properties of chromium beryllide (Be_{12}Cr), a promising neutron multiplier material for the blankets of future fusion reactors. As is known, the operation of fusion reactor blanket materials is characterized by high temperatures and radiation, which makes radiation resistance a primary requirement for such materials. The relevance of this work is driven by the need to conduct reactor tests of Be_{12}Cr samples manufactured by the hot vacuum pressing method. The aim of the study is to substantiate safety and determine the temperature-dose irradiation regimes at the WWR-K research reactor. The research methodology is based on coupled numerical modeling: neutron-physical analysis using the Monte Carlo method in MCNP 6 and thermophysical calculations using computational fluid dynamics methods in ANSYS Fluent 2024 R1.

As a result, detailed distributions of neutron fluxes, energy release fields, and temperatures were obtained. It was established that the dose accumulated over 6 irradiation cycles reaches 0.14 dpa. Thermophysical analysis showed that with a change in helium pressure in the range of 10–101325 Pa, the volume-averaged temperature of the samples varies in the range of 157–428 °C for the lower position and 135–499 °C for the upper position, respectively. Analysis of the data revealed a temperature inversion effect: at a pressure of 10 Pa, the temperature of the upper samples is 71 °C higher than that of the lower ones due to a change in the nature of heat transfer in the system. The scientific value of the research lies in obtaining the first set of calculated data

for a specially developed irradiation device designed for the reactor irradiation of chromium beryllide samples. The practical significance of the work consists in the creation of a verified tool for predictive analysis and planning of long-term reactor tests of Be_{12}Cr samples, ensuring compliance with the thermophysical safety limits of the experiment under WWR-K reactor conditions at specified temperature-dose regimes.

Keywords: WWR-K research reactor, chromium beryllide (Be_{12}Cr), irradiation device, thermal regime, dose regime, temperature inversion.

Введение

Бериллий является материалом, имеющим фундаментальное значение для ядерных технологий благодаря своим уникальным ядерно-физическим свойствам. На протяжении десятилетий он служит эффективным нейтронным отражателем, замедлителем и размножителем в исследовательских ядерных реакторах [1–3]. Также он имеет ключевую роль в будущих термоядерных реакторах, где он является основным размножителем нейтронов в бридерном blanketе [4].

Однако применение чистого бериллия в условиях интенсивного нейтронного облучения ограничено значительным радиационно-индуцированным износом. А именно под воздействием нейтронного облучения в бериллии происходят реакции ядерной трансмутации с образованием газообразных гелия и трития, которые накапливаются в материале и приводят к его разбуханию и охрупчиванию [5–7]. Эти радиационно-индуцированные эффекты (разбухание, охрупчивание, ухудшение тепловых характеристик и другие) представляют собой критические ограничения для применения чистого бериллия в будущих термоядерных реакторах [8–11].

Вследствие этого в последние десятилетия в качестве альтернативы чистому бериллию были предложены интерметаллиды бериллия (бериллиды) [12]. Они обладают более высокой температурой плавления и демонстрируют более низкую химическую реактивность с кислородом и водой [13], лучшую совместимость с конструкционными материалами [14], более высокую радиационную стабильность при нейтронном облучении и меньшее удержание трития [15].

В качестве перспективных материалов рассматриваются интерметаллические соединения Be_{12}Ti и Be_{12}V [16–18]. Среди перечисленных

бериллидов наиболее широко изучен бериллид титана (Be_{12}Ti), который показал многообещающие результаты в отношении коррозионной стойкости [19], однако продолжается поиск альтернативных бериллидов с оптимизированными термомеханическими, нейтронными и коррозионными свойствами. По этой причине подобная научно-исследовательская и опытно-конструкторская работа (НИОКР) остаётся важным направлением с практической пользой для будущих термоядерных реакторов класса DEMO [12, 15, 20–22].

В частности, в качестве потенциального материала-размножителя нейтронов в бридерных blanketах будущих термоядерных реакторов недавно был предложен бериллид хрома (Be_{12}Cr). Он обладает оптимальным сочетанием высокого сечения мультипликативной реакции ($n,2n$) для размножения нейтронов и одновременно низким сечением их поглощения [21, 23]. Несмотря на этот потенциал, экспериментальные данные о поведении Be_{12}Cr в условиях, соответствующих условиям применения в термоядерном реакторе, в настоящее время ограничены [24]. Это особенно важно для материалов, производимых с использованием промышленных технологий.

В связи с этим на исследовательском реакторе ВВР-К (Алматы, Казахстан) начаты работы по изучению коррозионной стойкости Be_{12}Cr , изготовленного на Ульбинском металлургическом заводе [25], после воздействия реакторного облучения и высокой температуры. В данной работе представлены разработанная конструкция облучательного устройства (ОУ) для реактора ВВР-К, результаты комплексных нейтронно-физических и теплофизических расчётов ОУ, которые демонстрируют и обосновывают температурно-дозовые режимы облучения образцов Be_{12}Cr , и анализ полученных расчётных данных.

Материалы и методы

Исследуемые образцы представляют собой пластины, изготовленные из интерметаллического соединения бериллия методом

горячего вакуумного прессования (ГВП) на Ульбинском металлургическом заводе (УМЗ). Основные характеристики рассматриваемых

образцов приведены в таблице 1, а их внешний вид показан на рисунке 1.

Таблица 1. Характеристики исследуемых образцов Be_{12}Cr

Параметр образца	Значение
Тип	Бериллид хрома
Химическая формула	Be_{12}Cr
Масса, г	0,09
Плотность, г/см ³	2,43
Размеры	$5,0 \times 5,0 \times 1,5$
Форма	Пластина

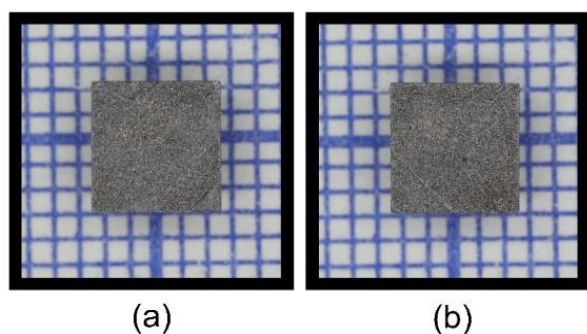
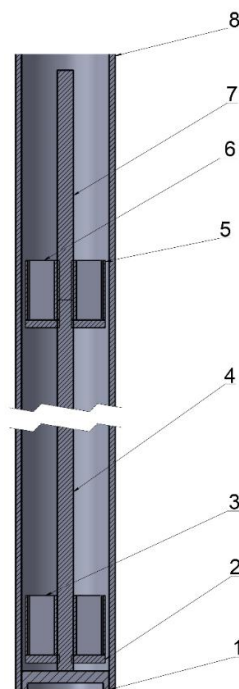


Рисунок 1 – Внешний вид образца Be_{12}Cr : лицевая (а) и обратная (б) стороны

С помощью системы автоматизированного проектирования **SOLIDWORKS** была разработана конструкция облучательной капсулы для испытания образцов бериллида хрома (Be_{12}Cr) в активной зоне реактора ВВР-К [26].

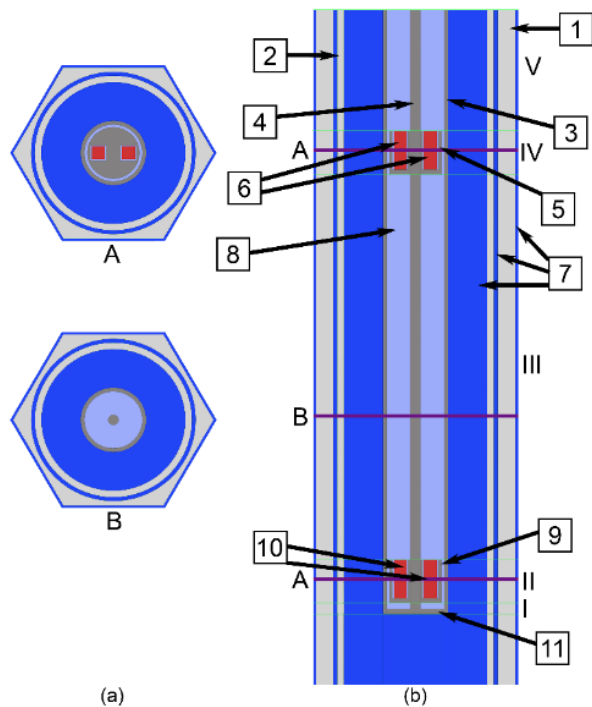
ОУ представляет собой капсулу из нержавеющей стали с наружным диаметром 20 мм. Толщина стенки капсулы составляет 1 мм. Капсула заполнена гелием, давление которого может варьироваться в диапазоне 10–101325 Па. Образцы размещаются в держателях из нержавеющей стали на двух разных расстояниях относительно центральной плоскости активной зоны, что позволяет облучать образцы при разных температурах и, соответственно, создавать различные температурно-дозовые режимы. Верхняя и нижняя части ОУ соединены шпилькой (центральным стержнем) из нержавеющей стали. Расстояние между верхним и нижним держателями составляет 150 мм. В держателях ОУ было размещено по 10 образцов, расположенных друг на друге. Таким образом, общая высота 10 образцов составила 15 мм. В расчётной модели все образцы бериллида хрома были описаны в качестве одного объекта и не были учтены микроразоры, образуемые между ними из-за наличия шероховатостей поверхностей.



1 – нижняя часть корпуса ОУ, 2 и 5 – держатели образцов, 3 и 6 – образцы Be_{12}Cr , 4 и 7 – центральный стержень, 8 – корпус ОУ из нержавеющей стали

Рисунок 2 – Модель ОУ с образцами бериллида хрома

Для анализа требуемых температурно-дозовых режимов образцов Be_{12}Cr было проведено комплексное нейтронно-физическое и теплофизическое моделирование ОУ. Численное моделирование нейтронно-физических характеристик ОУ было выполнено с помощью программного кода Monte Carlo N-Particle (MCNP) 6 [27], основанного на методе Монте-Карло. Суть метода заключается в многократном моделировании взаимодействия нейтронов и других частиц с веществом в материальной среде с использованием генератора случайных чисел. Сечения большинства реакций при моделировании MCNP берёт из библиотеки непрерывного сечения ENDF-VII.1 [28] для энергий в интервале 10^{-11} –20 МэВ. Статистическая точность моделирования с помощью метода Монте-Карло обеспечивалась проведением 500000 историй на цикл. Количество циклов составило 500, среди которых 50 – неактивные. На рисунке 3 представлены поперечные (а) и продольное (б) сечения математической модели ОУ в соответствии с размерами одной ячейки решётки активной зоны реактора ВВР-К в MCNP.



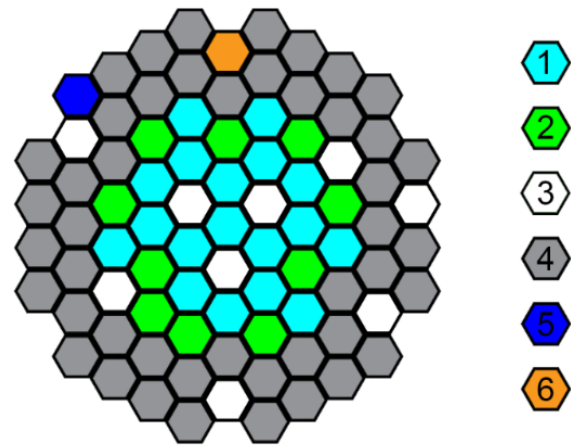
1 – внешняя часть канала из САВ-1, 2 – внутренняя часть канала из САВ-1, 3 – корпус ОУ из 12Х18Н10Т (нержавеющей стали), 4 – центральный стержень из нержавеющей стали, 5 – держатель верхних образцов из нержавеющей стали, 6 – верхние образцы Be_{12}Cr , 7 – теплоноситель первого контура, 8 – гелий, 9 – держатель нижних образцов из нержавеющей стали, 10 – нижние образцы Be_{12}Cr , 11 – нижняя часть корпуса ОУ. Зелёными линиями и римскими цифрами в правой части продольного сечения отмечены 5 областей, на которые была поделена модель для корректного учёта аксиального распределения энерговыделения. Фиолетовыми линиями и буквами А и В отмечены плоскости, в которых были выполнены поперечные сечения ОУ

Рисунок 3 – Поперечные (а) и продольное (б) сечения математической модели ОУ в MCNP

Схема активной зоны представлена на рисунке 4, оранжевой ячейкой отмечено расположение ОУ в периферийной облучательной позиции (ячейка 2-6). Выбор ячейки основывается на основных задачах исследования, которые определены как изучение дефектообразования и трансмутации газов на радиационную и коррозионную стойкости бериллида хрома Be_{12}Cr .

Для визуализации распределения плотности потока нейтронов в аксиальном и радиальном (на двух высотах) направлениях была использована карта FMESH с интервалом между узлами

решётки 1 мм. Распределение было построено для тепловых ($< 0,625$ эВ), эпитепловых (0,625 эВ–0,1 МэВ) и быстрых (от 0,1 до 20 МэВ) нейтронов. Ширина регистрируемой зоны составила 2 мм.



1 – тепловыделяющие сборки (ТВС) I-го типа, 2 – ТВС II-го типа, 3 – облучательные каналы, 4 – бериллиевые блоки, 5 – пустая ячейка, 6 – ОУ с образцами Be_{12}Cr

Рисунок 4 – Схема активной зоны исследовательского реактора ВВР-К

Расчёт влияния радиационного повреждения образцов интерметаллида Be_{12}Cr был произведён путём определения скорости образования смещений на атом (СНА, dpa) элементов Ве и Сг согласно представленному выражению:

$$\frac{R}{N} = \int_{E_d}^{E_{\max}} \phi(E_i) \sigma_D(E_i) dE_i, \quad (1)$$

где R – общее количество смещений на единицу объёма в единицу времени, N – атомная плотность вещества, E_i – энергия нейтрона, E_d – пороговая энергия смещения, $E_{\max}$ – верхний предел энергетического спектра (20 МэВ для реактора ВВР-К), ϕ – спектральная плотность потока нейтронов, σ_D – сечение смещения.

Расчёт скоростей и доз радиационного повреждения проводился с использованием сечений смещения Ве и Сг из специализированной библиотеки [29], основанной на формализме NRT (Norgett-Robinson-Torrens) [30]. Выбор модели обусловлен её статусом международного стандарта для оценки радиационной повреждаемости, что позволяет проводить сравнительный анализ рассчитываемых результатов с накопленным массивом данных для бериллидов. Несмотря на

развитие уточнённых моделей (например, ас-дра), учитывающих внутрикаскадную рекомбинацию дефектов, стандарт NRT остаётся базовым инструментом инженерных расчётов для обоснования реакторных экспериментов и используется для консервативного анализа накопления доз в образцах.

В рамках модели производится оценка числа создаваемых дефектов через повреждающую энергию первичного выбитого атома (ПВА). Данный подход учитывает разделение начальной энергии ПВА на два канала. В первом происходят неупругие потери на возбуждение и ионизацию электронных оболочек атомов, а также на возбуждение фононных колебаний (разогрев кристаллической решётки), которые не приводят к образованию смещений. Во втором происходят упругие столкновения с ядрами, в результате которых энергии ПВА достаточно для выбивания атомов из узлов кристаллической решётки. В модели используется коэффициент эффективности каскада, равный 0,8, который учитывает, что часть внутренних столкновений внутри каскада происходит с меньшей эффективностью за счёт перекрытия зон столкновений и эффектов рассеяния. Данный эффект приводит к меньшему числу финальных смещений по сравнению с идеализированным расчётом.

Для расчёта радиационной деградации бериллида хрома в MCNP использовалась карта множителя FM с реакцией смещения под номером 901 [31]. Согласно рекомендациям в [29], значения пороговой энергии смещения для бериллия и хрома в составе интерметаллида принимались равными 31,2 и 40 эВ соответственно.

Для корректного расчёта энерговыделения компонентов вытянутые в аксиальном направлении элементы модели (центральный стержень, канал из нержавеющей стали, и другие) были разделены на пять частей, для каждой из которых было определено индивидуальное значение удельного энерговыделения. Для учёта радиационного разогрева компонентов ОУ, обусловленного, по большей части, запаздывающими фотонами, была использована карта ACT FISSION=ALL.

Для нормализации выходных данных нейтронно-физических расчётов был применён коэффициент нормализации S , определяемый как

$$S = \frac{P[\text{Вт}] \cdot \bar{v} \left[\frac{\text{нейтрон}}{\text{дел}} \right]}{\left(1,6022 \cdot 10^{-13} \frac{\text{Дж}}{\text{МэВ}} \right) w_f \left[\frac{\text{МэВ}}{\text{дел}} \right]} \cdot \frac{1}{k_{\text{эфф}}}, \quad (2)$$

где P – номинальная тепловая мощность реактора, принимаемая за 6 МВт, $\bar{v}$ – среднее количество нейтронов, образующихся в ходе единичного распада ^{235}U , w_f – эффективная энергия, выделяемая за один акт деления ^{235}U (в среднем 200 МэВ). В свою очередь слагаемое $1/k_{\text{эфф}}$ учитывает отклонение эффективного коэффициента размножения нейтронов от единицы. Максимальная относительная статистическая погрешность расчётов не превысила 6 %.

Теплофизическое моделирование ОУ было выполнено в программном комплексе ANSYS Fluent 2024 R1 [32]. Моделирование теплообмена включало в себя учёт всех трёх видов теплопередачи: теплопроводности, конвективного и лучистого теплообменов. За счёт построения единой топологии моделей были созданы связанные интерфейсы для корректного описания теплопередачи между доменами. Для расчёта турбулентных течений в теплоносителе была выбрана модель $k-\omega$ SST, которая сочетает в себе точность $k-\omega$ в пристеночных областях и стабильность $k-\varepsilon$ в свободном потоке. С учётом спецификации задачи были учтены влияния сил плавучести и вязкого нагрева для максимально точного учёта возможной диссипации энергии. В пристенных областях использовался корреляционный подход, обеспечивающий плавный переход между ламинарным и турбулентным режимами в пограничном слое за счёт автоматического варьирования расчёта между аналитическими выражениями для вязкого подслоя и логарифмической области в зависимости от локального значения y^+ .

Для области гелия был принудительно задан ламинарный режим течения (путём активации опции Laminar Zone). Данное допущение обосновано низким значением числа Рейнольдса ($Re < 600$), что значительно ниже критического значения $Re_{\text{кр}} \approx 2300$, характерного для гладких труб. Для учёта лучистого теплообмена была использована модель Discrete Ordinates (DO) с обновлением итераций на каждом шаге для повышения точности сходимости в условиях разрежённого газа.

Скорость теплоносителя на входе в модели была принята за 48,4 см/с, температура была задана равной 40 °С. Температура обратного потока воды была принята за 50 °С [33]. Давление гелия внутри ОУ задавалось через граничное условие Pressure Outlet, что использовалось исключительно для задания требуемого режима газовой среды. Возможные локальные особенности течения вблизи граничной поверхности не оказывают влияния на тепловые процессы в основной части ОУ ввиду её

удалённости от рассматриваемой границы. Температура гелия в граничном условии Pressure Outlet была задана на основе вычисления среднеобъёмной температуры объёма гелия во всей системе для минимизации градиента температуры на границе модели. На всех границах раздела твёрдое тело – жидкость/газ использовалось условие прилипания. Внешние границы модели (за исключением граничных условий для воды и гелия) рассматривались как адиабатические. Излучательные способности ϵ были приняты, в соответствии с [34], равными 0,4 для 12X18H10T и САВ-1 и 0,5 для образцов Be₁₂Cr. Математическая модель в ANSYS Fluent полностью соответствует разделению элементов в соответствии с рисунком 3.

Теплофизическая модель решалась с использованием стационарного решателя на базе давления. Для всех уравнений использовалась дискретизация второго порядка для минимизации численной диффузии. Мониторинг сходимости осуществлялся как по невязкам, так и по контрольным значениям температур в некоторых компонентах ОУ. Критериями установления решения служили выход температур в ключевых зонах на плато с изменениями не более 1 градуса за 100 итераций, а также значение суммарного теплового баланса в системе менее 0,1 % от общей мощности заданного энерговыделения.

Сеточная модель ОУ в ANSYS Mesh представляет собой тетраэдральную сетку с 3366596 элементами и 571425 узлами. Качество сетки было оценено по нескольким параметрам, имеющим определённые диапазоны, рекомендованные в официальном руководстве ANSYS Fluent [35]. Проведённый анализ сеточной независимости путём сравнения результатов с сеточной моделью с количеством элементов, равным 1241091 и преимущественно состоящим из гексагональных элементов показал, что максимальная разница в температурах образцов составила 1,6 % (порядка 2,5 °C) для нижних образцов и 0,7 % (менее 1,0 °C) для верхних образцов. Незначительная разница в результатах при трёхкратном уменьшении плотности сетки и изменении её вида элементов позволяет утверждать, что для использованной сеточной модели ОУ была достигнута сеточная независимость. При этом важно отметить, что гексагональная сетка лучше передаёт градиенты в зазорах, что дополнительно подтверждает анализ сеточной независимости модели.

Плотности, коэффициенты теплопроводности и удельные теплоёмкости алюминиевого сплава САВ-1 и нержавеющей стали 12X18H10T были взяты с заданием зависимости физических

величин от температуры на основе базы данных [36]. Теплофизические свойства воды и гелия, включая удельную теплоёмкость, коэффициент теплопроводности и динамическую вязкость были взяты из базы данных National Institute of Standards and Technology (NIST) [37]. Плотность гелия в расчётах определялась из уравнения состояния идеального газа с учётом локальных значений давления и температуры. Удельная теплоёмкость и вязкость гелия были приняты равными значениям при нормальном давлении, поскольку в исследуемом диапазоне давления (до 10 Па) данные величины имеют пренебрежительно малую зависимость от давления и определяются преимущественно изменением температуры.

Коэффициент теплопроводности гелия при давлении 10 Па был рассчитан с учётом характера движения газа, определяемого числом Кнудсена Kn , равного отношению средней длины свободного пробега молекулы $\bar{\lambda}$ к расстоянию между теплообменивающими поверхностями

$$Kn = \frac{\bar{\lambda}}{d_{\text{хар}}}. \quad (3)$$

Взяв за характерный размер системы минимальный зазор с гелием, равный 0,875 мм, значение Kn составило 1,64, что соответствует переходному режиму разрежённого газа ($0,1 < Kn < 10$), когда столкновения молекул газа друг с другом и со стенками сопоставимы. Эффективный коэффициент теплопроводности прямо пропорционален характерному размеру системы ($\lambda_0 \propto d_{\text{хар}}$), поэтому выбирая минимальный зазор рассматривается консервативный случай с заведомо заниженным коэффициентом теплопроводности.

Эффективный коэффициент теплопроводности гелия при давлении 10 Па определялся с помощью выражения [38]

$$\lambda_{\text{эфф}} = \frac{\lambda_0}{1 + 2\beta \cdot Kn}, \quad (4)$$

где λ_0 – коэффициент теплопроводности газа при нормальных условиях, β – параметр, определяемый коэффициентом аккомодации α и показателем адиабаты γ . На основе температурной зависимости λ_0 для гелия была определена температурная зависимость $\lambda_{\text{эфф}}$ при давлении 10 Па. На рисунке 5 показано, что для конфигурации с 10 Па характерно снижение теплопроводности при росте температуры. Поведение синей кривой объясняется тем, что при переходе в режим Кнудсена ключевую роль начинает играть средняя длина свободного

пробега молекул. При фиксированном низком давлении величина $\bar{\lambda}$ растёт линейно с температурой ($\bar{\lambda} \propto T$), в то время как λ_0 растёт пропорционально $\sqrt{T}$. В результате линейный рост знаменателя в формуле (4) приводит к уменьшению эффективного коэффициента теплопроводности с увеличением температуры. Для сравнения, при атмосферном давлении высокая плотность газа минимизирует влияние изменения длины свободного пробега, что обеспечивает классический рост теплопроводности при нагреве газа, соответствующий красной кривой.

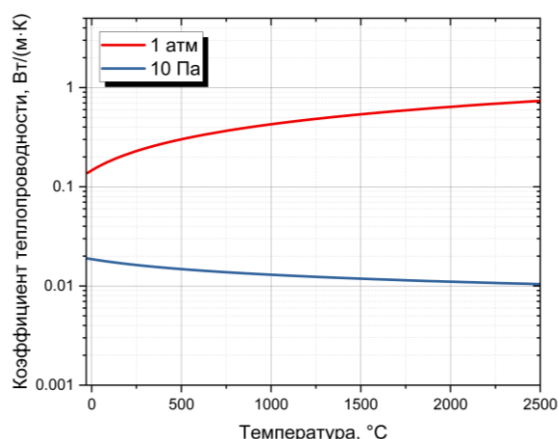


Рисунок 5 – Зависимость коэффициентов теплопроводности гелия при 1 атм (красная кривая) и 10 Па (синяя кривая) от температуры [37] в полулогарифмическом масштабе

Немаловажно отметить, что при давлении 10 Па уравнения переноса массы, импульса и энергии в газовой области решались в рамках стандартной вычислительной гидродинамики для обеспечения корректной сопряжённой теплопередачи между газовой и твёрдыми областями. В то же время анализ теплового баланса показал, что в условиях разрежённого гелия вклад конвективного переноса тепла существенно ниже вклада молекулярной теплопроводности (с учётом режима Кнудсена) и лучистого теплообмена. В связи с этим интерпретация тепловых режимов при давлении 10 Па выполнялась в терминах эквивалентного теплового сопротивления газового зазора.

Плотность интерметаллида Be_{12}Cr была принята постоянной и равной 2420 кг/м^3 [34]. Для расчёта коэффициента теплопроводности рассматриваемых образцов был использован закон Видемана-Франца [39], устанавливающий связь между теплопроводностью и электропроводностью металлов:

$$\frac{\lambda_e}{\sigma} = L \cdot T, \quad (5)$$

где λ_e – электронная составляющая коэффициента теплопроводности, $\text{Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$; L – число Лоренца, $\text{Вт}\cdot\Omega/\text{К}^2$; σ – удельная электропроводность, $1/(\Omega\cdot\text{м})$; T – абсолютная температура, К. В качестве приближения было использовано теоретическое значение числа Лоренца для модели свободного электронного газа [39] ввиду отсутствия прямых экспериментальных данных по теплопроводности Be_{12}Cr при высоких температурах:

$$L = \frac{\pi^2}{3} \cdot \left(\frac{k_B}{e}\right)^2 \approx 2,44 \cdot 10^{-8} \frac{\text{Вт}\cdot\Omega}{\text{К}^2}, \quad (6)$$

где k_B – коэффициент Больцмана, Дж/К; e – элементарный заряд, Кл. Как было упомянуто ранее, образцы Be_{12}Cr были получены методом ГВП на УМЗ. Хотя на микроуровне кристаллическая решётка бериллида хрома, согласно базе данных JARVIS [40], обладает выраженной анизотропией (отклонение локального коэффициента теплопроводности от $-27,7$ до $+23,7$ % относительно среднего значения), мелкозернистая поликристаллическая структура, характерная для метода ГВП, обеспечивает хаотичную ориентацию зёрен. Это позволяет рассматривать макроскопические свойства образцов как изотропные.

Среднее значение удельной электропроводности при температуре 600 К составило $2,23 \cdot 10^6 \text{ } 1/(\Omega\cdot\text{м})$. Важно отметить, что для рассматриваемого интерметаллида отсутствует доминирующий тип носителей заряда (разница в проводимости между n - и p -типами составляет $\sim 0,65$ %), что позволяет допустить использование усреднённого значения. Рассчитанная электронная составляющая коэффициента теплопроводности λ_e составила $32,65 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$. Полная теплопроводность материала λ определяется как сумма электронной λ_e и решётчатой $\lambda_{\text{реш}}$ составляющих:

$$\lambda = \lambda_e + \lambda_{\text{реш}}. \quad (7)$$

Решётчатая составляющая коэффициента теплопроводности $\lambda_{\text{реш}}$ была принята равной $1 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$ согласно консервативной оценке нижнего предела, представленного в [40]. Таким образом, итоговое значение коэффициента теплопроводности Be_{12}Cr , использованного в теплофизических расчётах, составило $33,65 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$.

Для оценки влияния неопределённости свойств интерметаллида Be_{12}Cr был проведён анализ чувствительности модели. Снижение

коэффициента теплопроводности на 23,7 % (до значения 26,4 Вт/(м · К)) привело к повышению температуры образцов менее чем на 1 °С. Это подтверждает, что в условиях разрежённого газа определяющую роль играет термическое сопротивление газового зазора и параметры лучистого теплообмена, а не внутренняя теплопроводность образцов.

Суммарная неопределённость полученных результатов складывается из погрешностей входных данных, численной сходимости и сеточной дискретизации. Численная устойчивость подтверждена достижением уровня невязок до 10^{-7} для энергии и стабилизации температуры в ключевых зонах (изменение менее 1 °С за 100 итераций). Дисбаланс по теплу составил менее 0,1 %. Сеточная независимость верифицирована сравнением результатов на двух сетках с различной плотностью и изменённым видом элементов и показала расхождение по температурам образцов менее 2 %. Для обеспечения запаса безопасности при анализе режимов облучения использовались заведомо

“худшие” сценарии входных данных. Так, температуры на входе и выходе из активной зоны выбраны исходя из максимально возможных температур теплоносителя в соответствующих областях [33]. Также, при расчёте теплопроводности гелия при давлении 10 Па использовался минимальный характерный размер, что привело к занижению эффективной теплопроводности. В неопределённость разработанной модели также входят принятые значения коэффициентов черноты: в реакторном эксперименте, при постоянном облучении и при высокой температуре коэффициенты черноты поверхностей нержавеющей стали или сплава алюминия могут меняться, что приведёт к изменению интенсивности теплопередачи с помощью лучистого теплообмена и приведёт к понижению температуры образцов, поэтому принятые значения являются консервативными допущениями для обеспечения безопасности ОУ. Таким образом, с учётом вышеизложенного, совокупная неопределённость численного моделирования оценивается в пределах ± 10 %.

Результаты и обсуждение

На рисунках 6 и 7 представлены аксиальное и радиальное распределения плотности потока тепловых, эпитепловых и быстрых нейтронов в ОУ. Все три группы нейтронов имеют индивидуальную палитру цветов и, соответственно, интервал значений плотности потока нейтронов, поскольку каждая из них характеризует индивидуальный диапазон энергий, и использование одного общего диапазона отрицательно скажется на визуализации полученных данных конкретных групп, при этом для верхнего и нижнего горизонтальных разрезов интервалы были приняты одинаковыми. На вертикальном распределении виден градиент плотности потока нейтронов от центра активной зоны реактора ВВР-К к её верхней части: значение плотностей потоков, в среднем, падает на 52,4 % на высоте 15 см выше центра активной зоны. Для тепловых и быстрых групп в области образцов заметно незначительное снижение плотности потока в связи с её поглощением конструкционными материалами и образцами. Важно отметить, что размещение ОУ в ячейке 2-6 вносит отрицательную реактивность $-0,01$ % $\Delta k/k$.

Полученные данные для плотностей потоков нейтронов согласуются с рассчитанными значениями дозы в таблице 2, так как скорость образования смещений в нижних образцах в среднем, выше, чем в верхних, на 71,1 и 76,5 %

для элементов Ве и Cr соответственно. Накопленная за 6 циклов доза (до 0,14 СнА) соответствует приблизительно 2–3 % от проектной дозы для материалов размножителей нейтронов в первичном бланкете термоядерного реактора ДЕМО, которая составляет 10–20 СнА за полный срок эксплуатации [41]. Хотя этот диапазон не соответствует условиям завершения жизненного цикла материала, полученной дозы достаточно для инициации начальных микроструктурных изменений и оценки образующейся коррозии на ранних стадиях деградации интерметаллида.

В таблице 3 представлены значения энерговыделений всех компонентов ОУ, которые были использованы в ходе теплофизического расчёта.

Результаты теплофизического моделирования продемонстрировали, что при изменении давления гелия с 1 атм до 10 Па средняя температура нижних образцов возрастает с 157 до 428 °С, в то время как средняя температура верхних образцов увеличилась с 135 до 499 °С. Таким образом, при давлении 1 атм средняя температура нижних образцов выше верхних, тогда как при смене давления происходит температурная инверсия и температура верхних образцов становится выше температуры нижних. Данное явление может быть объяснено путём детального анализа механизмов теплоотвода с

поверхностей образцов Be_{12}Cr , данные для которых представлены в таблице 4.

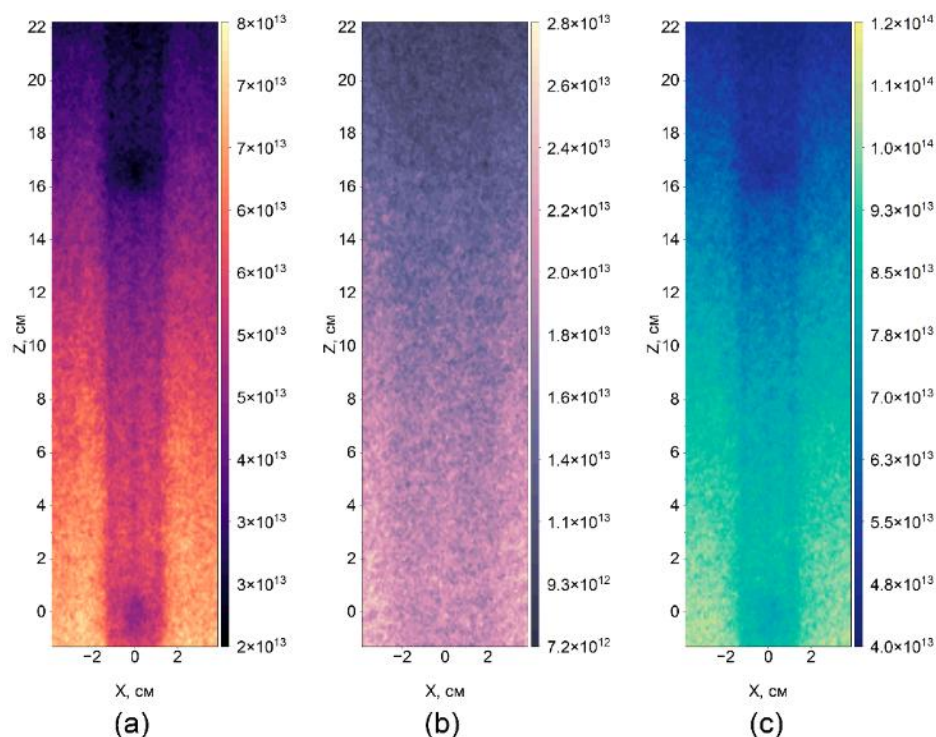


Рисунок 6 – Аксиальное распределение плотности потока тепловых (а), эпитепловых (б) и быстрых (с) нейтронов в плоскости ОУ с шириной регистрационной зоны 2 мм по всей высоте математической модели ОУ в ячейке 2-6

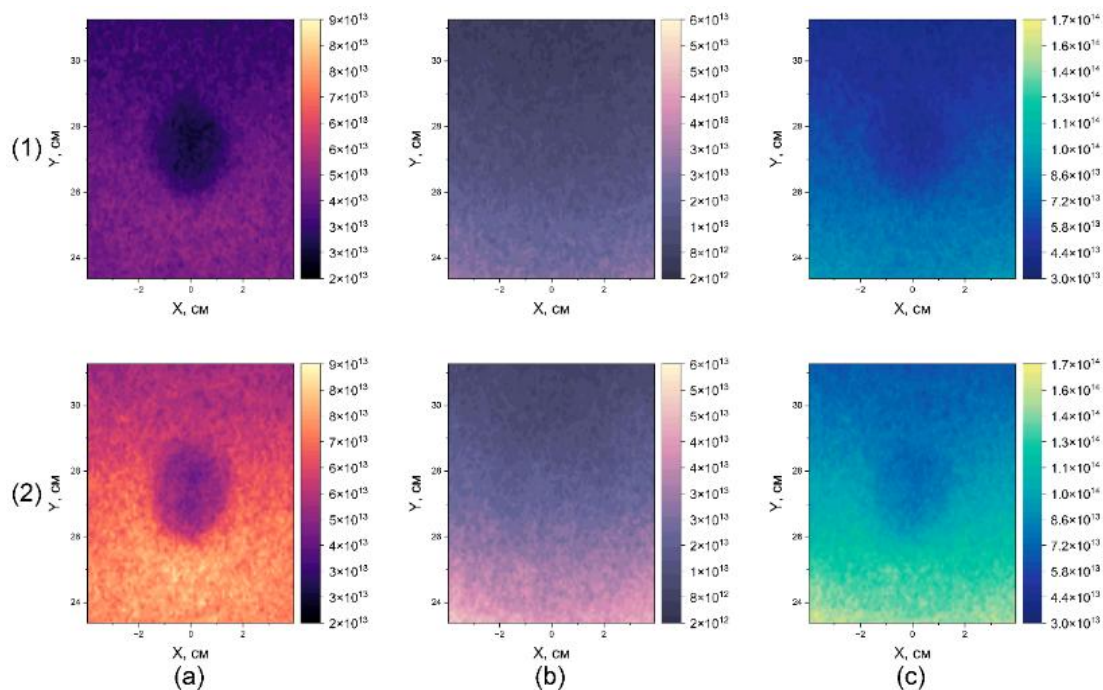


Рисунок 7 – Радиальное распределение плотности потока тепловых (а), эпитепловых (б) и быстрых (с) нейтронов в плоскости ОУ с шириной регистрационной зоны 2 мм по всей площади математической модели ОУ в ячейке 2-6 для верхних (1) и нижних (2) образцов

Таблица 2. Расчётные радиационные дозы образцов Be₁₂Cr, накопленных в ходе одного, трёх и шести циклов реакторного облучения

Образец Be ₁₂ Cr	Элемент	Скорость образования смещений, 10 ⁻⁹ /с	Доза за 1 цикл, 10 ⁻² СнА	Доза за 3 цикла, 10 ⁻² СнА	Доза за 6 циклов, 10 ⁻² СнА
Нижний левый	Be	6,63	1,20	3,61	10,83
	Cr	8,67	1,57	4,72	14,16
Нижний правый	Be	6,56	1,19	3,57	10,71
	Cr	7,46	1,35	4,06	12,18
Верхний левый	Be	3,64	0,66	1,98	5,94
	Cr	4,20	0,76	2,29	6,86
Верхний правый	Be	4,07	0,74	2,22	6,65
	Cr	4,94	0,90	2,69	8,07

Таблица 3. Удельные энерговыделения компонентов ОУ, полученные в MCNP. Примечание: римские цифры компонентов ОУ приведены в соответствии с рисунком 3

Компонента ОУ	Часть	Удельное энерговыделение	
		Вт/г	Вт/см ³
Нижний левый образец	-	0,70	1,70
Нижний правый образец	-	0,73	1,76
Верхний левый образец	-	0,45	1,09
Верхний правый образец	-	0,45	1,08
Нижний держатель	-	0,89	7,06
Верхний держатель	-	0,58	4,63
Центральный стержень	I	0,83	6,57
	II	0,86	6,82
	III	0,75	5,91
	IV	0,54	4,27
	V	0,52	4,12
Корпус ОУ	I	0,74	5,88
	II	0,93	7,37
	III	0,78	6,21
	IV	0,60	4,77
	V	0,52	4,15
Нижняя часть корпуса ОУ	-	0,63	4,97
Внутренний канал	I	0,46	1,25
	II	0,57	1,54
	III	0,48	1,30
	IV	0,37	1,01
	V	0,32	0,87
Внешний канал	I	0,65	1,76
	II	0,81	2,20
	III	0,69	1,86
	IV	0,53	1,44
	V	0,46	1,25

Таблица 4. Сравнительный анализ механизмов теплоотвода с контактных поверхностей образцов Be_{12}Cr для двух конфигураций давления. Примечание: P – давление, Δ – изменение значения потока 10 Па относительно 1 атм, $K\text{-}K/P$ – отношение кондуктивно-конвективного вклада к радиационному

Контакт	Образец Be_{12}Cr	P	Полный тепловой поток, Вт	Δ , %	Вклад излучения, 10^{-2} Вт	Δ , %	$K\text{-}K/P$, %
Гелий	Нижний левый	1 атм	0,23	–71,5	2,00	+499,5	91,5
		10 Па	0,07		10,97		64,3
	Нижний правый	1 атм	0,25	–71,4	2,02	+453,2	91,8
		10 Па	0,07		11,17		58,8
	Верхний левый	1 атм	0,34	–6,7	1,65	+1597,5	95,2
		10 Па	0,32		28,01		12,8
Верхние и нижние держатели из 12X18H10T	Верхний правый	1 атм	0,34	–6,2	1,65	+1598,9	95,2
		10 Па	0,32		27,95		12,7
	Нижний левый	1 атм	0,40	+41,5	-	-	-
		10 Па	0,57		-	-	-
	Нижний правый	1 атм	0,41	+42,3	-	-	-
		10 Па	0,59		-	-	-
	Верхний левый	1 атм	0,07	+34,2	-	-	-
		10 Па	0,09		-	-	-
	Верхний правый	1 атм	0,07	+32,7	-	-	-
		10 Па	0,09		-	-	-

При атмосферном давлении гелия и относительно низких температурах доминирующим механизмом теплоотвода является конвективно-кондуктивный перенос через газовую среду, доля которого находится в интервале 91,5–95,2 %. Вклад лучистого теплообмена в этом режиме незначителен и не превышает 10 % от суммарного теплового потока. Однако при переходе к давлению 10 Па структура теплового баланса меняется кардинально: суммарные тепловые потоки с поверхностей нижних и верхних образцов на контактных поверхностях с гелием снижаются на 71,5 и 6,5 % соответственно. Одновременно идёт рост роли излучения вследствие значительного роста температуры образцов: абсолютный вклад лучистого теплообмена возрастает, в среднем, на 476,4 % для нижних и на 1598,2 % для верхних образцов. В верхней части ОУ доля радиационного переноса становится доминирующей, составляя более 87 % от общего теплового потока на поверхности образцов. При этом для нижних образцов конвекция и теплопроводность остаются главными механизмами теплопередачи и составляют, в среднем, более 61 % от общего потока тепла.

Тепловая инверсия на образцах объясняется тем, что нижние образцы бериллида хрома имеют

более эффективный путь теплопередачи по сравнению с верхними образцами за счёт близкого соприкосновения нижнего держателя с корпусом ОУ из нержавеющей стали. В условиях вакуума нижние образцы имеют более эффективный путь сброса тепла через массивные металлические элементы конструкции, в то время как верхние образцы оказываются в большей тепловой изоляции из-за относительно большого расстояния (15 см) между нижними и верхними образцами. Вышесказанное также подтверждает то, что доли теплового потока через держатели из нержавеющей стали возрастают, в среднем, на 41,9 и 33,5 % соответственно.

Упомянутые выше изменения полного теплового потока при двух режимах давления наглядно иллюстрируют степень тепловой изоляции компонентов, поскольку относительно маленькое уменьшение полного теплового потока при переходе к вакууму (всего 6,5 % в сравнении с 71,5 %) вынуждает верхние образцы компенсировать недостаток теплопроводности повышением температуры до 499 °С, что на 16,6 % выше относительно средней температуры нижних образцов при 10 Па.

Аксиальное и радиальное распределения температурных полей представлены на рисунках 8 и 9 соответственно. Шкала для всех представ-

ленных распределений соответствует интервалу температур 40–550 °С. Как видно из приведённых рисунков, при атмосферном давлении температура верхних образцов на 22 °С ниже температуры нижних, при этом в конфигурации с давлением 10 Па наблюдается описанная выше температурная инверсия: в нижней части нижнего держателя, в месте соприкосновения с центральным стержнем, температура снижается, что говорит о наличии в рассматриваемой области так называемого теплового моста. Относительная неразличимость образцов на горизонтальных распределениях обусловлена практически идентичными температурами образцов и держателя.

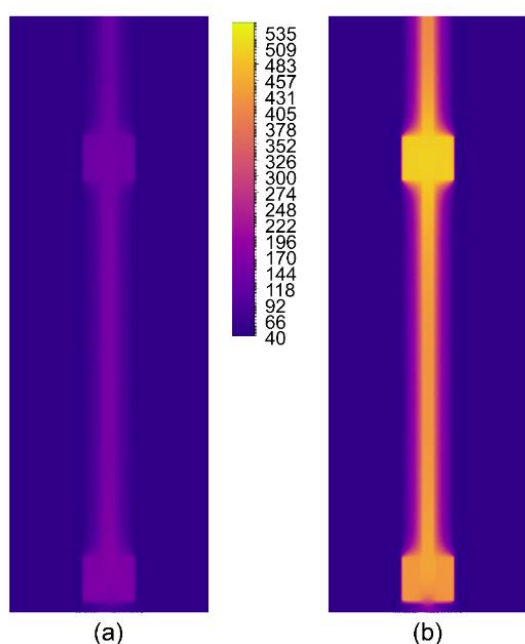


Рисунок 8 – Аксиальные температурные поля в ОУ для давлений 1 атм (а) и 10 Па (б)

Градиент температуры максимален, в обоих случаях, в зазоре между держателем и корпусом ОУ и составляет 1116,2 и 5584,1 °С/м для 1 атм и 10 Па соответственно. Это объясняется тем, что данный зазор является одним из основных участков термического сопротивления. Внешняя стенка корпуса ОУ эффективно охлаждается водой контура при температуре ~ 40 °С, в то время как держатель аккумулирует тепловую энергию от образцов и собственного радиационного разогрева. В свою очередь, пятикратный рост (около 400 %) величины температурного градиента при переходе в режим с давлением 10 Па обусловлен созданием теплового изолятора в виде разреженного гелия между компонентами ОУ.

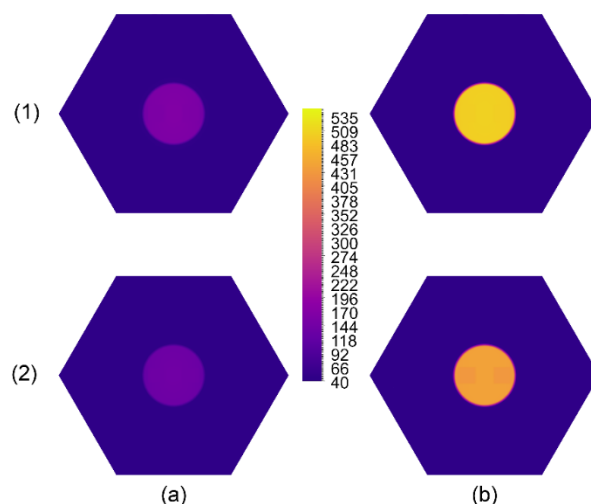


Рисунок 9 – Радиальные температурные поля в ОУ для давлений 1 атм (а) и 10 Па (б) на высоте верхних (1) и нижних (2) образцов Be_{12}Cr

В таблице 5 представлены максимальные и среднеобъёмные температуры для различных компонентов ОУ. Отсутствие среднеобъёмных температур для частей канала из САВ-1, центрального стержня, корпуса ОУ обуславливается тем, что в математической модели были рассмотрены их усечённые версии, поэтому расчёт среднеобъёмных температур будет некорректен ввиду отсутствия учёта части исключённых из модели компонентов. Разница температур между левым и правым образцами для верхнего и нижнего облучательных позиций составляет менее 1 °С, по этой причине в таблице приведены усреднённые значения для двух образцов. К тому же, из-за относительно маленького объёма образцов их среднеобъёмная и максимальная температуры практически идентичны.

Анализ температурных полей подтверждает, что основной вклад в нагрев образцов вносят массивные компоненты ОУ, подверженные интенсивному радиационному разогреву. Это подтверждается тем, что среднеобъёмные температуры верхнего и нижнего держателей в среднем на 1,2 % превышают температуры соответствующих образцов Be_{12}Cr . Таким образом, в условиях разреженного гелия при давлении 10 Па держатели выполняют роль дополнительных источников тепла, что в сочетании с уменьшением теплопроводности газового зазора приводит к наблюдаемому росту температуры.

При интерпретации полученных данных необходимо учитывать принятое допущение об идеальном тепловом контакте между компонентами ОУ. В реальных условиях наличие

микроскопических зазоров, шероховатостей поверхностей и оксидных плёнок создают дополнительное термическое сопротивление. Однако использование модели жёсткого механического соединения в данной работе обосновано целью выявления качественных закономерностей теплопереноса. Такой подход позволяет оценить предельно возможную эффективность образуемого теплового моста и

подтверждает, что даже в условиях минимального контактного сопротивления получаемые температуры и наблюдаемая температурная инверсия определяются, прежде всего, изменением свойств газовой среды и последующим увеличением вклада лучистого теплообмена в итоговую теплопередачу внутри ОУ.

Таблица 5. Среднеобъёмные и максимальные значения температур различных компонентов ОУ при двух режимах давления

Компонента	P	Максимальная температура, °C	Среднеобъёмная температура, °C
Верхние образцы Be ₁₂ Cr	1 атм	136	135
	10 Па	501	499
Нижние образцы Be ₁₂ Cr	1 атм	158	157
	10 Па	429	428
Верхний держатель	1 атм	139	135
	10 Па	503	500
Нижний держатель	1 атм	166	158
	10 Па	447	437
Центральный стержень	1 атм	166	-
	10 Па	499	-
Корпус ОУ	1 атм	103	-
	10 Па	219	-
Внутренняя часть канала из САВ-1	1 атм	41	-
	10 Па	41	-
Внешняя часть канала из САВ-1	1 атм	41	-
	10 Па	41	-
Гелий	1 атм	166	-
	10 Па	503	-
Вода	1 атм	47	-
	10 Па	49	-

Аксиальное и радиальное распределения температуры на рисунках 10 и 11 соответственно иллюстрируют практически полное отсутствие температурного градиента в образцах (разница температур составляет менее 5 °C), что говорит о высокой изотермичности образцов бериллида хрома. Симметричный характер радиального распределения и выход температурного профиля на уровень ~ 40 °C подтверждают эффективность теплоотвода на внешней стенке корпуса ОУ, охлаждаемой теплоносителем первого контура.

Флуктуации температуры в аксиальном распределении, наблюдаемые в области между образцами, вызваны численной диффузией и находятся в пределах статистической погрешности расчёта, не искажая качественный характер распределения. При этом полученные результаты подтверждают описанный ранее эффект тепловой

инверсии при переходе к разрежённому гелию с давлением 10 Па.

Результаты расчётов в ANSYS Fluent сопоставлялись с данными работы [25], выполненной в программном комплексе COMSOL Multiphysics.

В указанном исследовании температурный диапазон образцов при изменении давления составил 200–465 °C для нижних и 165–356 °C для верхних позиций, что, в целом, имеет хорошее согласие с результатами, представленными в данной работе. Некоторое отличие в результатах расчётов (в основном для образцов, расположенных в верхней части) объясняется точностью расчётной модели и использованными методологическими подходами.

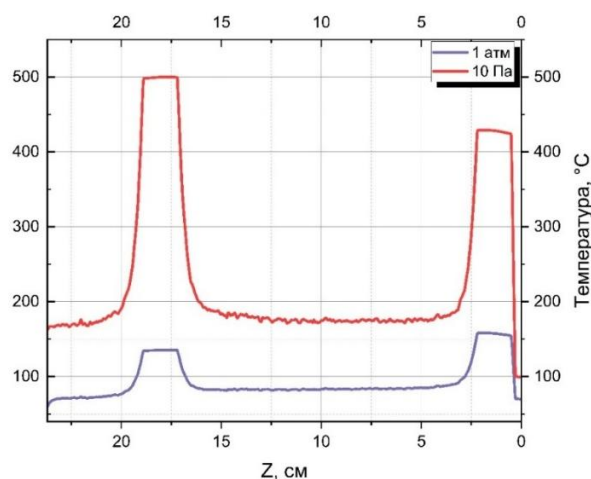


Рисунок 10 – Аксиальное распределение температуры в ОУ, усреднённое по центрам левого и правого образцов для обоих режимов давления. Движение в положительном направлении по оси Z соответствует движению вверх

Заключение

В ходе исследования были проведены комплексные нейтронно-физические и теплофизические расчёты разработанной конструкции ОУ, предназначенной для радиационного испытания Be_{12}Cr в реакторе ВВР-К. Совместное использование программного кода MCNP и программного комплекса ANSYS Fluent позволило определить температурно-дозовые режимы облучения образцов с учётом радиационного разогрева образцов и компонентов ОУ, а также различных режимов давления газовой среды внутри ОУ.

Анализ температурных полей ОУ показал, что при варьировании давления гелия от 1 атм до 10 Па среднеобъёмные температуры образцов бериллида хрома изменяются в интервале от 157 до 428 °C для нижнего и от 135 до 499 °C для верхнего расположений соответственно. Ключевым результатом стало выявление эффекта температурной инверсии: если при атмосферном давлении нижние образцы на 22 °C горячее верхних, то при переходе к вакууму (10 Па) ситуация меняется – температура верхних образцов достигает 501 °C, что на 16,6 % выше температуры нижних образцов. Физическая причина явления обусловлена сменой механизмов теплообмена: в разреженной среде доля радиационного переноса возрастает до 87 %, а сток тепла через конструкционный тепловой мост в нижней части ОУ оказывается более эффективным, чем в верхней. При этом важно отметить, что выявленный эффект инверсии при давлении 10 Па носит прогностический характер

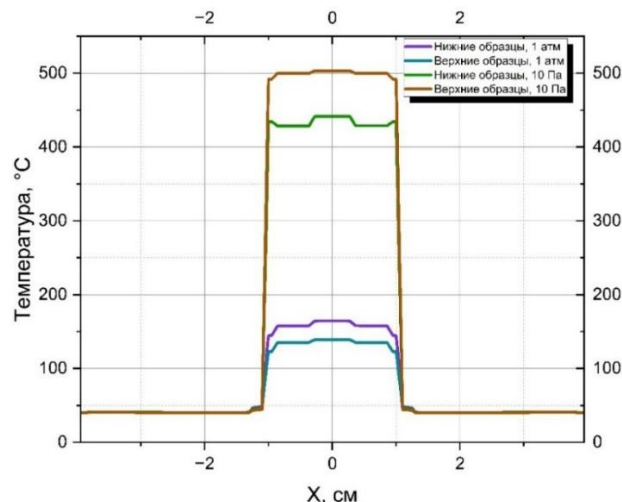


Рисунок 11 – Радиальное распределение температуры в ОУ на высоте нижних и верхних образцов для обоих режимов давления

и демонстрирует высокую чувствительность к качеству теплового контакта в условиях разреженного газа.

Спрогнозированы аккумулированные дозовые характеристики (до 0,14 СнА за 6 циклов облучения) образцов бериллида хрома при их облучении в реакторе ВВР-К. Полученные данные будут использованы при интерпретации результатов исследований по определению коррозионной и радиационной стойкости бериллида хрома.

Результаты моделирования подтверждают соблюдение пределов теплофизической безопасности во всём рабочем диапазоне давлений гелия (10 Па–1 атм). Максимальные температуры компонентов ОУ не достигают проектных пределов плавления материалов. Выявленный эффект температурной инверсии позволяет оптимизировать параметры реакторного эксперимента и уточнить температурный режим облучения Be_{12}Cr . Разработанный комплекс моделей является инструментом предиктивного анализа для обоснования безопасности и планирования долгосрочных испытаний бериллида хрома в условиях реактора ВВР-К при заданных температурно-дозовых режимах.

Финансирование

Данное исследование было профинансировано Комитетом науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан (BR24993119 «Характеризация перспективных материалов бланкета термоядерного реактора»).

Вклад авторов: **А.Ч. Ашибаев:** программное обеспечение, методология, исследование, формальный анализ, визуализация, написание – первоначальный вариант; **Ж.Т. Бугыбай:** ресурсы, программное обеспечение, методология, написание – первоначальный вариант; **К.С. Киселёв:** программное обеспечение, курирование данных; **А.М. Аханов:** курирование данных, визуализация; **С.К. Аскербеков:** методология, визуализация, формальный анализ; **Е.В. Чихрай:** исследование, валидация, формальный анализ; **А.А. Шаймерденов:** концептуализация, научное руководство, написание – проверка и редактирование.

Литература

1. G.R. Longhurst, K. Tsuchiya, C.H. Dorn, S.L. Folkan, T.H. Fronk, M. Ishihara, H. Kawamura, T.N. tranter, R. Rohe, M. Uchida, & E. Vidal, Managing Beryllium in Nuclear Facility Applications, *Nucl. Technol.* **176**, 430 (2011). <https://doi.org/10.13182/NT11-A13318>
2. M.R. Tonks, D.A. Andersson, and A. Aitkaliyeva, Computational design of materials for nuclear reactors, *NPJ Comput. Mater.* **12**, 106 (2026). <https://doi.org/10.1038/s41524-026-01980-8>
3. S.N. Koltoschnik and A.A. Shaimerdenov, Safety analysis for the WWR-K research reactor converted to LEU fuel, *Eurasian J. Phys. and Funct. Mater.* **3**, 204 (2019). <https://doi.org/10.29317/ejpfm.2019030302>
4. M. Nakamichi, Jae-Hwan Kim, M.M. Nakamura, T. Shibayama, C.K. Dorn, C. Vladimir, D.V. Bachurin, C. Stihl, P.V. Vladimirov, Beryllium and Its Alloys as Neutron Multiplying Materials, in *Comprehensive Nuclear Materials* (Elsevier, 2020), pp. 203–250. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-803581-8.11673-X>
5. G.R. Smolik, B.J. Merrill, and R. S. Wallace, Implications of beryllium: steam interactions in fusion reactors, *J. Nucl. Mater.* **191–194**, 153 (1992). [https://doi.org/10.1016/S0022-3115\(09\)80023-8](https://doi.org/10.1016/S0022-3115(09)80023-8)
6. V.P. Chakin, [V.A. Kazakov](#), A.A. Teykovtsev, V.V. Pimenov, G.A. Shimansky, Z.E. Ostrovsky, D.N. Suslov, R.N. Latypov, S.V. Belozarov, I.B. Kupriyanov, High dose neutron irradiation damage in beryllium as blanket material, *Fusion Eng. Des.* **58–59**, 535 (2001). [https://doi.org/10.1016/S0920-3796\(01\)00226-5](https://doi.org/10.1016/S0920-3796(01)00226-5)
7. V. Chakin, [R. Rolli](#), [A. Moeslang](#), [M. Klimenkov](#), M. Kolb, [P. Vladimirov](#), P. Kurinskiy, H.-C. Schneider, S. van Til, A.J. Magielsen, M. Zmitko, Tritium release and retention properties of highly neutron-irradiated beryllium pebbles from HIDOBE-01 experiment, *J. Nucl. Mater.* **442**, S483 (2013). <https://doi.org/10.1016/j.jnucmat.2013.03.032>
8. D.V. Bachurin, C. Stihl, and P.V. Vladimirov, Ab initio study of helium in titanium beryllides, *J. Nucl. Mater.* **606**, 155646 (2025). <https://doi.org/10.1016/j.jnucmat.2025.155646>
9. X. Zhu, Y. Zhao, J. Fan, Y. Li, D. Gao, Y. Zhang, W. Tang, Z. Li, First-principles study of the hydrogen-divacancy complexes in tetragonal Be12Ti, *Comput. Mater. Sci.* **258**, 114043 (2025). <https://doi.org/10.1016/j.commatsci.2025.114043>
10. P.-P. Liu, Q.-C. Wang, Y.-M. Jia, W.-T. Han, X.-O. Yi, Q. Zhan, and F.-R. Wan, Blistering Behavior of Beryllium and Beryllium Alloy under High-Dose Helium Ion Irradiation, *Materials* **17**, 3997 (2024). <https://doi.org/10.3390/ma17163997>
11. Y. Sugimoto, M. Miyamoto, J.-H. Kim, T. Hwang, and M. Nakamichi, Helium swelling behavior for neutron multipliers after irradiation with He ions at high temperatures, *Nucl. Mater. Energy* **38**, 101584 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.nme.2024.101584>
12. P.V. Vladimirov, V.P. Chakin, M. Dürrschnabel, R. Gaisin, A. Goraieb, F.A.H. Gonzalez, M. Klimenkov, M. Rieth, R. Rolli, N. Zimbe, S. Udartsev, M. Kolmakov, A. Vechkutov, E. Frants, Development and characterization of advanced neutron multiplier materials, *J. Nucl. Mater.* **543**, 152593 (2021). <https://doi.org/10.1016/j.jnucmat.2020.152593>
13. H. Kawamura, E. Ishitsuka, K. Tsuchiya, M. Nakamichi, M. Uchida, H. Yamada, K. Nakamura, H. Ito, T. Nakazawa, H. Takahashi, S. Tanaka, N. Yoshida, S. Kato, and Y. Ito, Development of advanced blanket materials for a solid breeder blanket of a fusion reactor, *Nucl. Fusion* **43**, 675 (2003). <https://doi.org/10.1088/0029-5515/43/8/306>
14. P. Vladimirov, D. Bachurin, V. Borodin, V. Chakin, M. Ganchenkova, A. Fedorov, M. Klimenkov, I. Kupriyanov, A. Moeslang, Current Status of Beryllium Materials for Fusion Blanket Applications, *Fusion Sci. Technol.* **66**, 28 (2014). <https://doi.org/10.13182/FST13-776>
15. V. Chakin, [R. Rolli](#), H.-C. Schneider, R. Gaisin, [P. Vladimirov](#), [M. Klimenkov](#), [M. Duerrschnabel](#), N. Zimber, [M. Rieth](#), [B. Gorr](#), [F. A. Hernández](#), D. Radloff, A. Fedorov, M. Zmitko, [M. Nakamichi](#), S. Udartsev, High-dose neutron irradiation of beryllium and titanium beryllide: Summary and outlook, *Nucl. Mater. Energy* **42**, 101910 (2025). <https://doi.org/10.1016/j.nme.2025.101910>
16. V. Chakin, A. Fedorov, R. Gaisin, and M. Zmitko, Swelling of Highly Neutron Irradiated Beryllium and Titanium Beryllide, *J. Nucl. Eng.* **3**, 398 (2022). <https://doi.org/10.3390/jne3040026>
17. J.-H. Kim, S. Nakano, M. Miyamoto, and M. Nakamichi, A recycling process on vanadium beryllium intermetallic compounds as advanced neutron multipliers for DEMO fusion applications, *Fusion Eng. Des.* **162**, 112124 (2021). <https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2020.112124>
18. R. Gaisin, V. Chakin, P. Vladimirov, F. A. Hernández, S. Udartsev, A. Vechkutov, and M. Kolmakov, Industrial-scale manufacturing experience of titanium beryllide block for DEMO blanket application, *Fusion Eng. Des.* **161**, 111862 (2020). <https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2020.111862>

19. A. Shaimerdenov et al., Effect of neutron irradiation on high-temperature corrosion of titanium beryllide Be₁₂Ti in a steam-argon environment, *J. Nucl. Mater.* **618**, 156236 (2026). <https://doi.org/10.1016/j.jnucmat.2025.156236>
20. J. Wang, M. Lei, H. Yang, M. Liu, H. Deng, H. Zhu, Z. Cai, and Q. Wu, Predicting the crushing behavior of pebbles: Theoretical model and experiment verification, *Fusion Eng. Des.* **194**, 113929 (2023). <https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2023.113929>
21. R. Gaisin, R. Rolli, M. Podoinikov, V. Kuksenko, K. Seemann, T. Bergfeldt, V. Chakin, and P. Vladimirov, Microstructure and high-temperature mechanical performance of industrial-scale titanium and chromium beryllides for fusion applications, *J. Alloys Compd.* **1044**, 184503 (2025). <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2025.184503>
22. A. Shaimerdenov, A. Akhanov, Sh. Gizatulin, A. Nessipbay, B. Shakirov, S. Askerbekov, T. Kulsartov, I. Kenzhina, A. Larionov, S. Akayev, S. Udartsev, Effect of low-temperature neutron irradiation on the properties of titanium beryllide, *Nucl. Mater. Energy* **38**, 101582 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.nme.2024.101582>
23. S.J. Zinkle and A. Quadling, Extreme materials environment of the fusion “fireplace,” *MRS Bull.* **47**, 1113 (2022). <https://doi.org/10.1557/s43577-022-00453-9>
24. A. Shaimerdenov, D. Sairanbayev, T. Kulsartov, Sh. Gizatulin, A. Akhanov, Zh. Zaurbekova, S. Askerbekov, A. Dikov, A. Larionov, S. Udartsev, M. Kylyshkanov, M. Podoinikov, Irradiation experiments of titanium beryllide samples in the WWR-K reactor, *Ann. Nucl. Energy* **194**, 110120 (2023). <https://doi.org/10.1016/j.anucene.2023.110120>
25. R. Gaisin, Y. Frants, M. Kolmakov, B. Zorin, M. Kylyshkanov, M. Podoinikov, S. Udartsev, A. Vechkutov, V. Chakin, P. Vladimirov, Beryllium intermetallics: Industrial experience on development and manufacture, *Nucl. Mater. Energy* **35**, 101444 (2023). <https://doi.org/10.1016/j.nme.2023.101444>
26. A.A. Shaimerdenov, D.A. Nakipov, F.M. Arinkin, Sh.Kh. Gizatulin, P.V. Chakrov, and Ye.A. Kenzhin, The 50th Anniversary of the WWR-K Research Reactor, *Phys. At. Nucl.* **81**, 1408 (2018). <https://doi.org/10.1134/S1063778818100162>
27. C. Werner, J.S. Bull, C.J. Jr. Solomon, F.B. Brown, G.W. McKinney, M.E. Rising, D. A. Dixon, R. L. Martz, H.G. III Hughes, L. J. Cox, A.J. Zukaitis, J.C. Armstrong, R.A.F. Iii, L. Casswell, *MCNP Version 6.2 Release Notes* (Los Alamos National Laboratory, 2018). <https://doi.org/10.2172/1419730>
28. M.B. Chadwick, M. Herman, P. Obložinský, M.E. Dunn, Y. Danon, A.C. Kahler, ENDF/B-VII.1 Nuclear Data for Science and Technology: Cross Sections, Covariances, Fission Product Yields and Decay Data, *Nucl. Data Sheets* **112**, 2887 (2011). <https://doi.org/10.1016/j.nds.2011.11.002>
29. A.Y. Konobeyev and D. Leichtle, *Arc-Dpa and NRT Displacement Cross-Sections for Neutron Irradiation of Materials from Be to Bi Calculated Using JEFF-4T1, ENDF/B-VIII, JENDL-5, and TENDL-2021 Data* (KIT, 2022). <https://doi.org/10.5445/IR/1000147764>
30. M.J. Norgett, M.T. Robinson, and I.M. Torrens, A proposed method of calculating displacement dose rates, *Nucl. Eng. Des.* **33**, 50 (1975). [https://doi.org/10.1016/0029-5493\(75\)90035-7](https://doi.org/10.1016/0029-5493(75)90035-7)
31. NEA Data Bank, *Joint Evaluated Fission and Fusion File (JEFF-3.3)* (OECD Nuclear Energy Agency, 2017). <http://www.oecd-neo.org/dbdata/jeff/jeff33/>
32. ANSYS Inc., *ANSYS Fluent Workbench Tutorial Guide, Release 2024 R1* (ANSYS Inc., Canonsburg, PA, 2024).
33. A.Ch. Ashibayev, D.S. Sairanbayev, and A.A. Shaimerdenov, Development and Thermophysical Analysis of an Irradiation Capsule Model for Mo-99 Production in the WWR-K Reactor, *NNC RK Bull.* **4**, 55–64 (2025). [A.Ch. Ashibayev, D.S. Sairanbayev, and A.A. Shaimerdenov, *Razrabotka i teplofizicheskij analiz modeli obluchatel'noj kapsuly dlya proizvodstva Mo-99 v reaktore WWR-K, Vestnik NYAC RK* **4**, 55–64 (2025). (in Russ)]. <https://doi.org/10.52676/1729-7885-2025-4-55-64>
34. Zh.T. Bugbay et al., Development of irradiation capsule design and plan for neutron irradiation of chromium beryllide samples in the WWR-K reactor, *Nucl. Mater. Energy* **47**, 102118 (2026). <https://doi.org/10.1016/j.nme.2026.102118>
35. ANSYS Inc., *ANSYS Fluent Workbench Tutorial Guide, Release 2026 R1*, (ANSYS Inc., Canonsburg, PA, 2026).
36. *Comprehensive Nuclear Materials*, 2nd ed., edited by R.J.M. Konings and R.E. Stoller (Elsevier, Amsterdam, 2020).
37. W.E. Acree, Jr. and J.S. Chickos, in *NIST Chemistry WebBook, NIST Standard Reference Database Number 69*, edited by P.J. Linstrom and W.G. Mallard (NIST, Gaithersburg, MD, 2026), <https://doi.org/10.18434/T4D303>
38. M.G. Kaganer, *Thermal insulation in low temperature technology* (Mashinostroenie, Moscow, 1966) [M. G. Kaganer, *Teplovaya izolyaciya v tekhnike nizkikh temperatur* (Mashinostroenie, Moskva, 1966)]. (in Russ).
39. C. Kittel, *Introduction to Solid State Physics*, 8th ed. (Wiley, New York, 2005).
40. K. Choudharym, K.F. Garrity, A. C. E. Reid, B. DeCost, A.J. Biacchi, A.R. Hight Walker, Z. Trautt, J. Hattrick-Simpers, A. Gilad Kusne, A. Centrone, A. Davydov, J. Jiang, R. Pachter, G. Cheon, E. Reed, A. Agrawal, X. Qian, V. Sharma, H. Zhuang, S.V. Kalinin, B.G. Sumpter, G. Pilania, P. Acar, S. Mandal, K. Haule, D. Vanderbilt, K. Rabe & F. Tavazza, The joint automated repository for various integrated simulations (JARVIS) for data-driven materials design, *npj Comput. Mater.* **6**, 173 (2020). <https://doi.org/10.1038/s41524-020-00440-1>
41. G. Federici, L. Boccaccini, F. Cismondi, M. Gasparotto, Y. Poitevin, I. Ricipito, An overview of the EU breeding blanket design strategy as an integral part of the DEMO design effort, *Fusion Eng. Des.* **141**, 30 (2019). <https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2019.01.141>

Сведения об авторах

Ашибаев Арыстан Чингизович (автор-корреспондент) – инженер Лаборатории проблем безопасности атомной энергии (ЛПБАЭ), Институт ядерной физики, (Алматы, Казахстан, e-mail: arystanashibayev29@gmail.com).

Бұғыбай Жанар Тұрғангазықызы – младший научный сотрудник ЛПБАЭ, Институт ядерной физики (Алматы, Казахстан, e-mail: bugybay.zh@gmail.com).

Киселёв Кирилл Сергеевич – ведущий инженер ЛПБАЭ, Институт ядерной физики, (Алматы, Казахстан, e-mail: kkisselyov@inp.kz).

Аханов Асыл Мақсатұлы – ведущий инженер ЛПБАЭ, Институт ядерной физики, (Алматы, Казахстан, e-mail: aakhanov@inp.kz).

Аскербеков Саулет Қаныбекұлы – PhD, ассоц. проф., старший научный сотрудник ЛПБАЭ, Институт ядерной физики, (Алматы, Казахстан, e-mail: askerbekov@physics.kz).

Чихрай Евгений Васильевич – к.т.н., ведущий научный сотрудник Научно-исследовательского института экспериментальной и теоретической физики, КазНУ имени Аль-Фараби», (Алматы, Казахстан, e-mail: chikhhray@physics.kz).

Шаймерденов Асет Абдуллаевич – PhD, ассоц. проф., заведующий ЛПБАЭ, Институт ядерной физики, (Алматы, Казахстан, e-mail: ashaimerdenov@inp.kz).

Авторлар туралы мәлімет:

Ашибаев Арыстан Чингизович (автор-корреспондент) – Атом энергиясының қауіпсіздігі мәселелері зертханасының (АЭҚМЗ) инженері, Ядролық физика институты, (Алматы, Қазақстан, e-mail: arystanashibayev29@gmail.com).

Бұғыбай Жанар Тұрғангазықызы – АЭҚМЗ кіші ғылыми қызметкері, Ядролық физика институты, (Алматы қ., Қазақстан, e-mail: bugybay.zh@gmail.com).

Киселёв Кирилл Сергеевич – АЭҚМЗ жетекші инженері, Ядролық физика институты», (Алматы, Қазақстан, e-mail: kkisselyov@inp.kz).

Аханов Асыл Мақсатұлы – АЭҚМЗ жетекші инженері, Ядролық физика институты, (Алматы, Қазақстан, e-mail: aakhanov@inp.kz).

Әскербеков Саулет Қаныбекұлы – PhD, қауым. проф., АЭҚМЗ аға ғылыми қызметкері, Ядролық физика институты, (Алматы, Қазақстан, e-mail: askerbekov@physics.kz).

Чихрай Евгений Васильевич – т.ғ.к., Эксперименттік және теориялық физика ғылыми-зерттеу институтының жетекші ғылыми қызметкері, Әл-Фараби атындағы ҚазҰУ, (Алматы, Қазақстан, e-mail: chikhhray@physics.kz).

Шаймерденов Асет Абдуллаевич – PhD, қауым. проф., АЭҚМЗ меңгерушісі, Ядролық физика институты, (Алматы, Қазақстан, e-mail: ashaimerdenov@inp.kz).

Author Information

Arystan Ashibayev (corresponding author) – Engineer at the Laboratory of Atomic Energy Safety Problems (LAESP), Institute of Nuclear Physics, (Almaty, Kazakhstan, e-mail: arystanashibayev29@gmail.com).

Zhanar Bugybay – Junior Researcher at the LAESP, Institute of Nuclear Physics, (Almaty, Kazakhstan, e-mail: bugybay.zh@gmail.com).

Kirill Kisselyov – Lead Engineer at the LAESP, Institute of Nuclear Physics, (Almaty, Kazakhstan, e-mail: kkisselyov@inp.kz).

Assyl Akhanov – Lead Engineer at the LAESP, Institute of Nuclear Physics», (Almaty, Kazakhstan, e-mail: aakhanov@inp.kz).

Saulet Askerbekov – PhD, Assoc. Prof., Senior Researcher at the LAESP, Institute of Nuclear Physics, (Almaty, Kazakhstan, e-mail: askerbekov@physics.kz).

Yevgeniy Chikhay – Cand. Tech. Sc., Lead Researcher at the Scientific Research Institute of Experimental and Theoretical Physics, Farabi University, Almaty, Kazakhstan, e-mail: chikhhray@physics.kz

Asset Shaimerdenov – PhD, Assoc. Prof., Head of the LAESP, Institute of Nuclear Physics, (Almaty, Kazakhstan, e-mail: ashaimerdenov@inp.kz).

История статьи: поступила: 08 мая 2026; принята: 20 июля 2026.

Мақала тарихы: түсті: 08 мамыр 2026; қабылданды: 20 шілде 2026.

Article history: received: 08 May 2026; accepted: 20 July 2026.