




МРНТИ 58.91.29

<https://doi.org/10.26577/RCPH97220266>

Ю.Н. Гордиенко* , В.С. Бочков , А.Д. Ноқанова , О.С. Букина ,
Ю.Ю. Бакланова , Э. Сапарбек 

Филиал института атомной энергии Национального ядерного центра Республики Казахстан,
Курчатов, Казахстан

*e-mail: gordienko@nnc.kz

НИЗКОТЕМПЕРАТУРНАЯ ДЕСОРБЦИЯ ИМИТАТОРА ЖИДКИХ РАДИОАКТИВНЫХ ОТХОДОВ ИЗ ПЕРЛИТА: ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ И ПРОДУВКИ ПО ДАННЫМ ТГА/ДСК-МС

В работе представлены результаты комплексного исследования десорбционных характеристик вспученного перлита марки М100 (ТОО «UNION PERLITE», Республика Казахстан), пропитанного имитатором жидких радиоактивных отходов (ЖРО) при массовом соотношении сорбент: раствор = 1:6. Исследования выполнены методом ТГА/ДСК-МС на установке «ТиГрА» в изотермическом режиме при 40 и 70°C с выдержкой 24 ч в двух вариантах: без газовой продувки и при продувке потоком сухого воздуха (50 мл/мин). Установлено, что десорбция носит исключительно физический характер и обусловлена испарением свободной воды, составляющей ~51% от начальной массы образца, что количественно соответствует доле воды, внесённой с имитатором ЖРО. Повышение температуры с 40 до 70 °C приводит к существенному ускорению выхода на стационарный режим в 4,6 раза (с 9,2 до 2,0 ч без продувки; с 9,4 до 1,8 ч при продувке), тогда как газовая продувка в исследованных лабораторных условиях оказывает незначительное влияние на кинетику (<10% ускорения при 70°C).

Масс-спектрометрический анализ подтвердил отсутствие газовой выделенной органических и неорганических летучих соединений, кроме водяного пара (доминирующий сигнал $m/z = 18$). На ДСК-кривых термические эффекты (экзо- или эндотермические) не зарегистрированы. Полученные результаты подтверждают химическую и термическую инертность исследованного перлита и его перспективность для технологий низкотемпературной сушки и временного хранения кондиционированных ЖРО.

Ключевые слова: перлит, жидкие радиоактивные отходы, сорбент, десорбция, ТГА/ДСК-МС, низкотемпературная сушка.

Ю.Н. Гордиенко*, В.С. Бочков, Э.Д. Ноқанова, О.С. Букина,
Ю.Ю. Бакланова, Э. Сапарбек

Қазақстан Республикасы Ұлттық ядролық орталығының Атом энергиясы институтының филиалы,
Курчатов, Қазақстан

*e-mail: gordienko@nnc.kz

Перлиттен сұйық радиоактивті қалдықтар имитаторының төмен температуралық десорбциясы: температураның және үрлеудің ТГА/ДСК-МС деректері бойынша әсері

Жұмыста М100 маркалы кеңейтілген перлиттің (ЖШС «UNION PERLITE», Қазақстан Республикасы) сұйық радиоактивті қалдықтар (СРҚ) имитаторымен сорбент:ерітінді = 1:6 массалық қатынасында сіңірілген үлгілерінің десорбциялық сипаттамаларын кешенді зерттеу нәтижелері ұсынылған. Зерттеулер ТГА/ДСК-МС әдісімен «ТиГрА» қондырғысында 40 және 70 °C температураларда 24 сағат бойы ұстап тұру арқылы изотермиялық режимде, екі нұсқада: газ ағынынсыз және құрғақ ауа ағынында (50 мл/мин) жүргізілді. Десорбцияның тек физикалық сипатта болатыны және үлгінің бастапқы массасының шамамен 51%-ын

құрайтын еркін судың булануымен шартталатыны анықталды, бұл СРҚ имитаторымен енгізілген су үлесіне сандық тұрғыдан сәйкес келеді. Температураны 40-тан 70 °С-қа дейін арттыру стационарлық күйге жету уақытын 4,6 есе қысқартады (газ ағынынсыз 9,2-ден 2,0 сағатқа дейін; ал газ ағыны кезінде 9,4-тен 1,8 сағатқа дейін), ал зертханалық газдық ағын жағдайында кинетикаға елеусіз әсер етеді (70 °С-та <10% жеделдеу).

Масс-спектрометриялық талдау органикалық және бейорганикалық ұшпа қосылыстардың бөлінбейтінін, тек су буының (басым сигнал $m/z = 18$) тіркелетінін көрсетті. ДСК-деректерінде экзо- немесе эндотермиялық әсерлер байқалмады. Алынған нәтижелер зерттелген перлиттің химиялық және термиялық инерттілігін, сондай-ақ оның СРҚ-ты төмен температурада кептіру және уақытша сақтау технологияларында қолдану перспективалылығын растайды.

Түйін сөздер: кеңейтілген перлит, сұйық радиоактивті қалдықтар, сорбент, десорбция, ТГА/ДСК-МС, төмен температуралық кептіру.

Yu.N. Gordienko*, V.S. Bochkov, A.D. Nokanova, O.S. Bukina,
Yu.Yu. Baklanova, E. Saparbek

Institute of Atomic Energy Branch of the National Nuclear Center of the Republic of Kazakhstan,
Kurchatov, Kazakhstan

*e-mail: gordienko@nnc.kz

Low-temperature desorption of IRW simulant from perlite: temperature and purging influence according to TGA/DSC–MS data

The results of an in-depth study into the desorption properties of expanded perlite grade M100 (LLP “UNION PERLITE”, Republic of Kazakhstan) impregnated with a liquid radioactive waste (LRW) simulant at a sorbent-to-solution mass ratio of 1:6 are presented in this paper. The investigations were performed by TGA/DSC-MS simultaneous technique using the “TiGrA” experimental complex under isothermal conditions at 40 and 70 °C with a holding time of 24 h in two modes: without gas purging and with a flow of dry air (50 mL/min). Desorption was found to be purely physical and associated with the evaporation of free water. The observed mass loss (~51% of the initial sample mass) is consistent with the water content of the LRW simulant used for impregnation. Increasing the temperature from 40 to 70 °C results in a 4.6-fold reduction in the time required to reach a steady state (from 9.2 to 2.0 h without purging; from 9.4 to 1.8 h with purging), whereas gas purging under laboratory conditions has only a minor effect on the process kinetics (<10% acceleration at 70 °C).

Mass spectrometric analysis confirmed the absence of gaseous release of organic or inorganic volatile compounds other than water vapor (dominant signal at $m/z = 18$). No exothermic or endothermic effects were observed on the DSC curves. The obtained results confirm the chemical and thermal inertness of the investigated perlite and its potential applicability in technologies for low-temperature drying and interim storage of conditioned LRW.

Keywords: perlite, liquid radioactive waste, sorbent, desorption, TGA/DSC–MS, low-temperature drying.

Введение

Жидкие радиоактивные отходы (ЖРО) представляют собой один из наиболее сложных классов отходов ядерного топливного цикла, требующих надежных технологий кондиционирования для обеспечения безопасного обращения, транспортировки и хранения [1, 2]. Актуальность данной проблемы определяется необходимостью минимизации объемов отходов, подлежащих

окончательному захоронению, а также снижением рисков миграции радионуклидов в окружающую среду на всех этапах жизненного цикла ядерных установок. В соответствии с международными требованиями в области ядерной и радиационной безопасности долгосрочному хранению и окончательному захоронению подлежат исключительно радио-

активные отходы в твердой форме. Данное положение закреплено в рекомендациях Международное агентство по атомной энергии (МАГАТЭ), предусматривающих обязательную переработку и кондиционирование ЖРО с целью получения стабильных твердых форм, обеспечивающих долговременную изоляцию радионуклидов [3-5]. Следовательно, перевод ЖРО в устойчивое нетекучее состояние является необходимым этапом их обращения и ключевым условием обеспечения безопасности.

Одним из перспективных подходов является перевод ЖРО в нетекучее состояние с использованием неорганических сорбентов [6], позволяющих стабилизировать жидкую фазу и сформировать матричную систему, пригодную для последующей переработки или захоронения. Однако эффективность таких технологий существенно зависит от физико-химических характеристик конкретного типа отходов.

Солесодержащие ЖРО характерны для эксплуатации реакторов на быстрых нейтронах [7], предприятий по переработке отработавшего ядерного топлива и систем дезактивации в ряде стран. Высокая концентрация растворенных солей существенно осложняет процессы твердения и ограничивает применимость традиционных технологий иммобилизации [8]. Особенно актуальна данная проблема для отходов, образовавшихся при эксплуатации реакторной установки БН-350 [9,10] в Республике Казахстан. Указанные отходы относятся к категории среднеактивных, характеризуются высоким солесодержанием, а их радионуклидный состав определяется преимущественно присутствием ^{137}Cs .

В условиях развития атомной энергетики в Республике Казахстан [11], включая эксплуатацию исследовательских реакторов [12-17] и реализацию перспективных энергетических проектов, задача эффективного управления ЖРО приобретает стратегическое значение. В этой связи перед НЯЦ РК, обладающим профильными компетенциями в данной области [18-20], стоит задача разработки и внедрения технологических решений, обеспечивающих надежную иммобилизацию ЖРО реакторной установки БН-350 [21,22]

Материалы и методы

В качестве объекта исследования выступал порошкообразный сорбент, пропитанный имитатором ЖРО. Сорбент – вспученный перлит марки М100 производства ТОО «UNION PERLITE» (г. Алматы, Казахстан) [25].

с учетом их физико-химических и радиационных характеристик [23,24].

В качестве одного из кандидатных сорбционных материалов рассматривается перлит – горная порода вулканического происхождения, представляющая собой гидратированное вулканическое стекло с содержанием конституционной воды более 1 % и развитой пористой структурой (до 40 %). Его физико-химические свойства – низкая плотность (до $0,05 \text{ г/см}^3$), термическая стабильность и химическая инертность – обуславливают широкое применение в строительстве, сельском хозяйстве и промышленной фильтрации. Перлит можно рассматривать как перспективный материал для иммобилизации ЖРО, поскольку он способен удерживать значительные объемы жидкости (до 400 % от собственной массы) за счет развитой пористой структуры.

В то же время, для практического применения важно детально изучить, как из перлита удаляется влага после контакта с модельными ЖРО. Остаточное содержание влаги в материале может со временем влиять на коррозионное состояние контейнеров. Не менее существенным является вопрос безопасности при термической обработке: необходимо подтвердить, что при нагреве перлита не происходит выделение летучих радиоактивных соединений или токсичных газов. Данное требование является обязательным при разработке технологий переработки и кондиционирования ЖРО.

Настоящая работа направлена на комплексную оценку десорбционного поведения перлита казахстанского производства, пропитанного имитатором ЖРО, при термообработке сорбента в режимах, релевантных для промышленных технологий низкотемпературной сушки. Особое внимание уделено анализу кинетики удаления влаги, влиянию газовой среды на процесс сушки, а также выявлению возможных вторичных процессов (химических реакций и термодеструкции), способных повлиять на безопасность и технологичность предлагаемого решения.

Преимущественный размер частиц порошка от 0,1 мм до 0,4 мм (72%) и плотность $0,05 \text{ г/см}^3$. Химический состав сорбента включает типичные для перлита оксиды: SiO_2 , Al_2O_3 , K_2O , Na_2O , Fe_2O_3 , MgO , CaO , а также химически связанную

воду в структуре минерала (конституционную воду). Выбор данной марки обусловлен ее доступностью на внутреннем рынке Казахстана и стандартизированными характеристиками вспучивания [26]. В качестве имитатора ЖРО был применен водный раствор неорганических солей с содержанием воды от 58 мас.% до 62 мас.% и солей от 38 мас.% до 42 мас.%. Состав имитатора подобран таким образом, чтобы моделировать реальную солевую нагрузку жидких отходов исследовательских реакторов, не используя при этом активные радионуклиды на этапе отработки технологии. Имитатор был капельно добавлен в количестве 6 массовых частей на 1 часть сухого

сорбента в алундовый тигель (600 мкл), заполненный сорбентом 2/3 объема. Такое соотношение выбрано для достижения предельной емкости сорбента при сохранении его сыпучести или формировании стабильной пасты, что типично для процессов кондиционирования.

На рисунке 1 показаны этапы подготовки образца к испытаниям, включающие последовательную загрузку сухого перлита (рис. 1а), дозированное введение жидкого имитатора (рис. 1б), контрольное взвешивание для фиксации начальной массы влаги (рис. 1в) и подготовку готовой навески для размещения в анализаторе (рис. 1г).

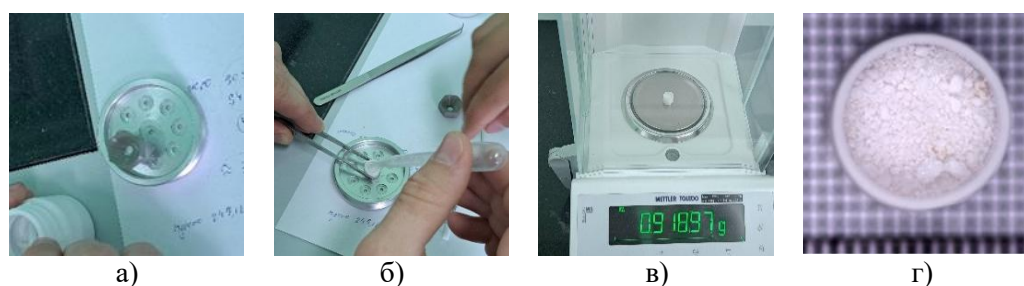


Рисунок 1 – Подготовка исследуемого образца к испытаниям: а) загрузка сорбента в тигель, б) ввод ЖРО в сорбент, в) взвешивание сорбента с ЖРО, г) готовая навеска образца

Испытания проводились на установке ТиГрА [27-29], включающей анализатор TGA/DSC 3+ (METTLER TOLEDO, Швейцария) и квадрупольный масс-спектрометр ThermoStar (PFEIFFER VACUUM, Германия). На рисунке 2 показана принципиальная схема установки ТиГрА.

Данная установка обеспечивает возможность параллельно применять три метода анализа в ходе одного эксперимента: термогравиметрия (ТГА), дифференциально-сканирующая калориметрия (ДСК) и масс-спектрометрия (МС) в диапазоне температур от 22°C до 1500°C, в соответствии с установленной температурной программой. Синхронизация данных о потере массы, тепловом потоке и составе газовой фазы в ходе измерений обеспечивает онлайн мониторинг кинетики протекающих процессов, с возможностью анализа в режиме реального времени.

В ходе экспериментов образцы изотермически выдерживались при температурах 40 °С и 70°С в течение 24 часов. Эксперименты проводились в двух режимах:

1) в статической воздушной атмосфере (без продувки) и

2) при продувке осушенным воздухом с расходом 50 мл/мин. Температурные режимы выбраны для моделирования условий

естественной сушки (40 °С) и ускоренной термообработки (70°С), которые можно применить на промышленном оборудовании без риска термического разложения органических веществ.

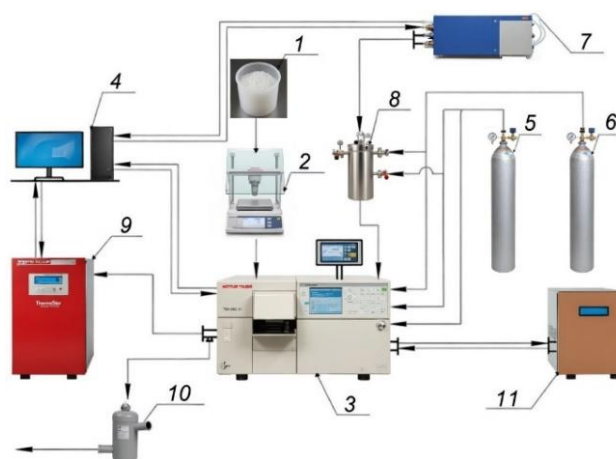


Рисунок 2 – Принципиальная схема установки ТиГрА: 1 – исследуемый образец; 2 – аналитические весы MS105DU; 3 – аналитический прибор TGA-DSC 3+; 4 – персональный компьютер; 5 – баллон с защитным газом; 6 – баллон с реакционным газом; 7 – генератор влаги МНГ-32; 8 – резервуар для смешивания газов; 9 – масс-спектрометр ThermoStar; 10 – фильтр для выходного газа; 11 – криостат

Зарегистрированные параметры охватывали изменение массы образца (ТГ-анализ) с точностью $\pm 0,1$ мкг, тепловой поток, подводимый к образцу (ДСК-анализ), с чувствительностью 1 мкВт, состав газовой фазы (МС-анализ). В МС-анализе контролировались токи ионизации при следующих значениях m/z : M2 (H_2^+); M12 (C^+);

M14 (CH_2^+ / N^+); M16 (CH_4^+ / O^+); M18 (H_2O^+); M28 (CO^+); M32 (O_2^+); M40 (Ar^+); M44 (CO_2^+). Такой набор массовых чисел позволяет детектировать широкий спектр возможных продуктов разложения органических примесей, карбонатов, а также выделения газов радиолитического происхождения.

Результаты и обсуждение

На рисунках 3 и 4 представлены результаты испытаний, полученные при температурах 40°C и 70 °С, выполненные в режимах без продувки и с продувкой осушенным воздухом. Графики отражают синхронное изменение массы, теплового потока и интенсивности сигналов масс-спектрометра во времени, что позволяет коррелировать потерю массы с выделением конкретных газовых компонентов и тепловыми эффектами.

Во всех экспериментальных сериях зафиксирована монотонная потеря массы с последующим выходом на плато, что видно на средних графиках рисунков 3 и 4. Степень десорбции составила 50,43–51,6% от начальной массы образца. Эта величина соответствует

испарению водной фракции (58–62%) внесённого имитатора ЖРО при соотношении сорбент/имитатор равное 1:6. Данные результаты указывают на преимущественно физический характер сорбции и отсутствие значимого химического связывания компонентов имитатора с матрицей перлита в исследованных условиях. Если бы происходило хемосорбционное связывание воды или образование кристаллогидратов солей, степень потери массы была бы ниже, либо требовались бы более высокие температуры для дегидратации. Наблюдаемая стабильность потери массы во всех сериях опытов подтверждает воспроизводимость свойств перлита марки М100 как сорбента.

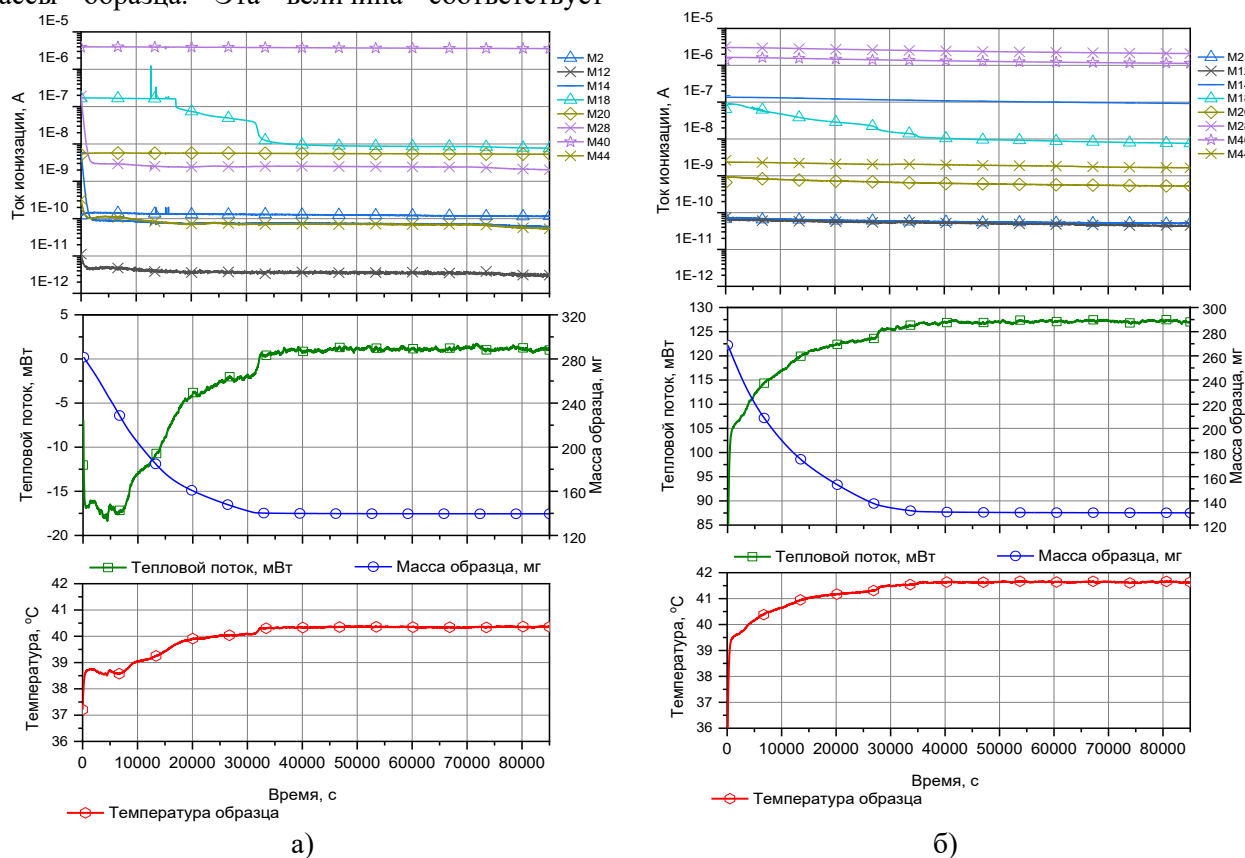


Рисунок 3 – Результаты испытаний при температуре 40°C образца сорбента пропитанного имитатором ЖРО: а) без продувки, б) с продувкой осушенным воздухом

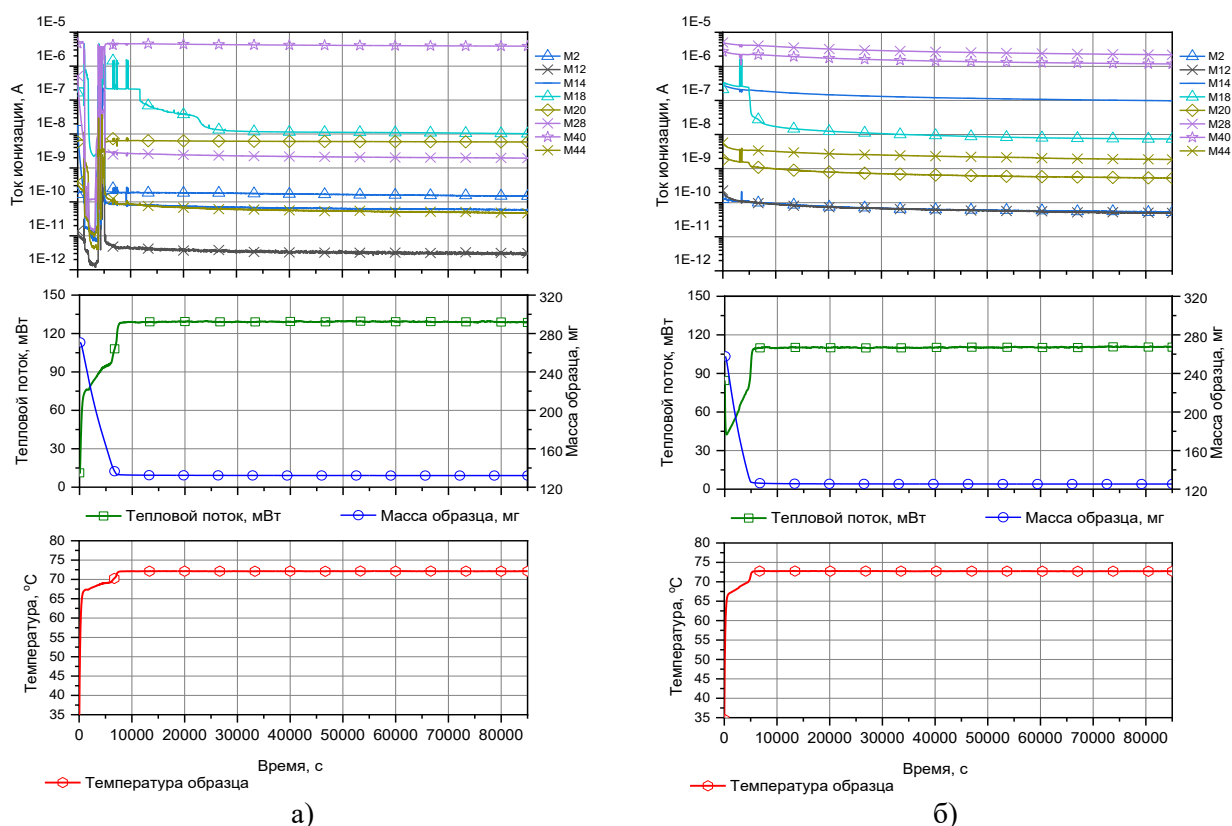


Рисунок 4 – Результаты испытаний при температуре 70°C образца сорбента пропитанного имитатором ЖРО: а) без продувки, б) с продувкой осушенным воздухом

Кинетика десорбции оказалась высокочувствительной к температуре, но слабо зависимой от режима газовой среды, что подтверждается данными таблицы 1 и рисунков 5 и 6. Повышение температуры с 40°C до 70°C привело к ускорению достижения стационарного состояния в 4,6 раза: время выхода на плато сократилось с 550 мин (~9,2 ч) до 120 мин (~2,0 ч) без продувки и с 564 мин (~9,4 ч) до 108 мин (~1,8 ч) с продувкой (рис. 5). Наблюдаемая зависимость соответствует

диффузионно-кинетической модели испарения, в рамках которой скорость процесса определяется температурой на границе раздела фаз и градиентом концентрации пара в пограничном слое. Повышение температуры приводит к увеличению давления насыщенного пара воды в порах перлита, что, в свою очередь, усиливает движущую силу массопереноса влаги из объема материала к его поверхности.

Таблица 1 – Сравнительные характеристики десорбции перлита (РК), пропитанного имитатором ЖРО

Параметр	Температура образца 40 °С		Температура образца 70 °С	
	без продувки	с продувкой	без продувки	с продувкой
Начальная масса, мг	281,63	268,97	270,78	257,71
Конечная масса, мг	139,62	130,16	132,08	125,33
Относительная потеря массы, %	50,43	51,6	51,22	51,4
Время выхода на плато, мин	550	564	120	108
Доминирующий компонент газовой фазы	H ₂ O ⁺ (m/z=18)	H ₂ O ⁺ (m/z=18)	H ₂ O ⁺ (m/z=18)	H ₂ O ⁺ (m/z=18)

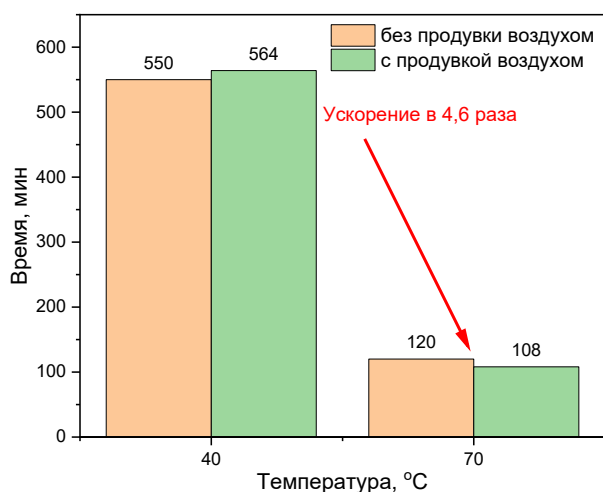


Рисунок 5 – Влияние температуры на кинетику десорбции

Минимальное влияние продувки (<5% различия во времени десорбции при 40 °C и ~10% при 70 °C, рисунок 5) указывает на то, что в исследованных условиях лимитирующей стадией является внутренняя диффузия влаги в порах перлита, а не внешний массообмен. Высокая паропроницаемость системы даже в статических условиях объясняется развитой пористой структурой перлита (преимущественно открытые поры в диапазоне 0,1-0,4 мм), обеспечивающей эффективную транспортировку пара к внешней поверхности. Это имеет важное практическое значение, так как упрощает конструкцию сушильного оборудования: отсутствие необходимости в мощной системе принудительной вентиляции снижает энергозатраты и усложнение инженерных систем.

Кривые ДСК во всех экспериментах показывали линейный тренд и не содержали каких-либо экзо- или эндотермических пиков (рисунки 3 и 4, средний график, зеленая кривая). Отсутствие ярко-выраженных тепловых эффектов на кривых указывает на то, что в системе не происходят химические реакции. В частности, не наблюдается разложения солей имитатора, дегидратации кристаллогидратов, окислительных процессов или каких-либо изменений в структуре перлита. Это означает, что процесс десорбции идет спокойно, без химических превращений, и связан главным образом с испарением воды при равномерном подводе тепла. Если бы в системе присутствовали органические соединения на ДСК-кривых появились бы характерные тепловые эффекты, связанные с их разложением или окислением. Поскольку таких эффектов не зафиксировано,

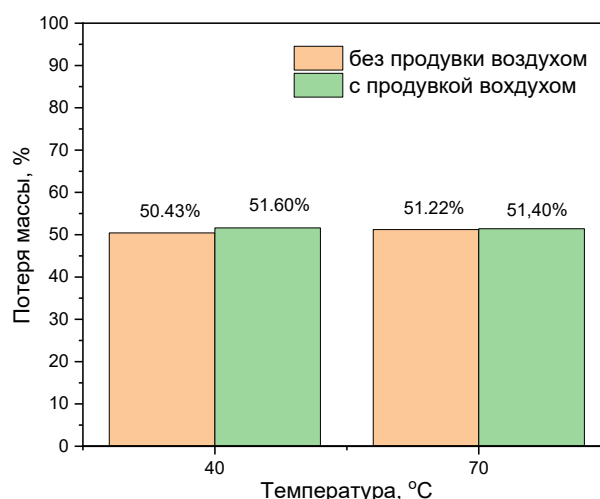


Рисунок 6 – Относительная потеря массы сорбента, пропитанного имитатором ЖРО в экспериментах с без продувки осушенным воздухом и с продувкой

можно говорить о стабильности системы «перлит-солевой раствор».

Результаты МС анализа газовой фазы (рисунки 3 и 4, верхний график) подтверждает этот вывод. Основной вклад в сигнал дает ион H_2O^+ (M18), причем его изменение совпадает по времени с потерей массы образца. Сигналы по другим массам M2, M12, M14, M16, M28, M32, M40, M44, остаются на уровне фона и не превышают 0,5% от сигнала воды. В частности, отсутствие сигналов для M44 и M28 указывает на то, что даже при 70°C не происходит разложение карбонатов или органических примесей. Это важно с точки зрения радиационной безопасности, так как исключается поступление радиоактивных аэрозолей и летучих соединений углерода в вентиляционную систему при сушке реальных отходов.

Полученные данные свидетельствуют о физическом механизме десорбции [30, 31] — испарении несвязанной (химически свободной) воды из пор перлита. Высокая пористость и открытая структура вспученного перлита обеспечивают хорошую паропроницаемость, что позволяет полностью удалить влагу даже без продувки. Процесс соответствует стандартной кинетике испарения: с повышением температуры увеличиваются давление насыщенного пара воды и коэффициент диффузии, что ускоряет массоперенос. При этом максимальная степень десорбции почти не меняется: при 70 °C она составляет в среднем 51,3 %, а при 40 °C — 51,0 %. Это говорит о том, что полное удаление свободной влаги осуществляется при 40 °C. Остаточная масса образца (~49 %) соответствует количеству сухого вещества (перлит и соли

имитатора), что подтверждает отсутствие связанной воды при этой температуре. Режим при 70 °С оказывается более предпочтительным с точки зрения производительности, так как позволяет сократить продолжительность процесса почти в 5 (4,6) раз.

В лабораторных условиях, где используется небольшой объем материала, продувка осушенным воздухом практически не влияет на скорость сушки. Это связано с тем, что процесс в данном случае ограничен внутренней диффузией влаги в порах сорбента [32], а не внешним массообменом. Однако, в промышленных условиях ситуация может измениться. При работе с большими объемами материала и значительной толщиной слоя, а также при повышенной влажности окружающей среды продувка или вакуумирование способны заметно ускорить процесс сушки.

Перлит широко применяется как абсорбент для жидких отходов благодаря своей высокой впитывающей способности и малому увеличению

массы. В ядерной отрасли его используют, в частности, для стабилизации шламов и в составе композитных сорбентах. Полученные результаты показывают, что после насыщения влагу из перлита можно эффективно удалять при сравнительно низких температурах, без риска образования вторичных летучих продуктов. Это имеет принципиальное значение для обеспечения безопасности при обращении с ЖРО.

Кроме того, химическая инертность перлита в исследованном температурном диапазоне подтверждает возможность его использования для длительного хранения кондиционированных отходов. Матрица, не взаимодействует с солевыми компонентами имитатора ЖРО и сохраняет свою структуру. Это означает, что со временем не ожидается разрушения материала или выделения газов, способных повысить давление внутри контейнера. В результате снижаются требования к герметичности контейнеров и уменьшается риск возникновения аварийных ситуаций.

Заключение

Комплексные ТГА/ДСК-МС исследования перлита марки М100, пропитанного имитатором ЖРО, показали, что в диапазоне 40-70°С удаление влаги носит физический характер и связано, главным образом, испарением свободной воды. Степень десорбции (около 51%) соответствует количеству введенного раствора, что указывает на обратимость процесса сорбции и отсутствие химического взаимодействия между компонентами. Это позволяет рассматривать перлит как стабильную матрицу, сохраняющую свои свойства в процессе сушки.

Скорость десорбции существенно зависит от температуры. При повышении температуры с 40 °С до 70 °С скорость процесса увеличивается примерно в 4,5-5 раз: время выхода на плато сокращается с ~9,3 ч до ~1,9 ч. При этом продувка осушенным воздухом со скоростью 50 мл/мин практически не влияет на кинетику процесса (ускорение менее 5% при 70 °С). Это говорит о том, что лимитирующей стадией является перенос влаги внутри пор перлита, а не внешний массообмен. С практической точки зрения это позволяет снизить расход продувочного газа и упростить энергобаланс сушильной установки.

Отсутствие заметных тепловых эффектов на ДСК-кривых, а также регистрация в газовой фазе только водяного пара подтверждают, что процесс протекает без химических превращений. Не зафиксировано выделение CO₂, CO, CH₄, что

исключает разложение как имитатора ЖРО, так и самой перлитовой матрицы в рассматриваемом диапазоне температур. Это снижает риск вторичного загрязнения рабочей зоны и упрощает требования к системе газоочистки.

Высокая термическая стабильность перлита и его химическая инертность по отношению к компонентам имитатора ЖРО подтверждают перспективность его использования при разработке технологий кондиционирования ЖРО.

Результаты также показывают, что низкотемпературная сушка при 70 °С является оптимальным режимом с точки зрения энергоэффективности и скорости процесса. Дополнительно подтверждается возможность временного хранения компонентов на основе перлита без риска газовыделения, что важно для промежуточных стадий обращения с отходами.

Рассматривается и потенциальное применение перлита в барьерных системах при захоронении низкоактивных отходов, где требуется стабильность материала.

Для практического внедрения технологии необходимы дополнительные исследования с использованием реальных ЖРО, содержащих радионуклиды (¹³⁷Cs, ⁹⁰Sr), с оценкой их удержания в перлитовой матрице после термообработки.

Также требуется изучить стойкость материала к выщелачиванию при воздействии

влаги и оценить влияние радиолитиза на десорбционные свойства в длительной перспективе.

Проведение вышеприведенных исследований позволит обоснованно оценить применимость технологии на предприятиях атомной отрасли Республики Казахстан.

Благодарность

Работа выполнена при финансовой поддержке Комитета науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан в рамках проекта «НИР по обоснованию выбора и реализации технологии переработки жидких радиоактивных отходов» (BR24993140).

Вклад авторов

Ю.Н. Гордиенко: ресурсы, методология, проведение исследования, написание – первоначальный вариант, написание – рецензирование и редактирование. **В.С. Бочков:** курирование данных, проведение исследования, программное обеспечение, валидация. **Э.Д. Ноқанова:** визуализация, проведение исследования, формальный анализ. **О.С. Букина:** привлечение финансирования, администрирование проекта. **Ю.Ю. Бакланова:** научное руководство, формальный анализ. **Э. Сапарбек:** курирование данных, проведение исследования.

Литература

1. D. Deng, L. Zhang, M. Dong, R. E. Samuel, A. Ofori-Boadu, and M. Lamssali, Radioactive waste: A review, *Water Environ. Res.* **92**, 1818–1825 (2020). <https://doi.org/10.1002/wer.1442>
2. R. O. A. Rahman, H. A. Ibrahim, and Y.-T. Hung, Liquid radioactive wastes treatment: A review, *Water* **3**, 551–565 (2011). <https://doi.org/10.3390/w3020551>
3. International Atomic Energy Agency, *Disposal of Radioactive Waste*, IAEA Safety Standards Series No. SSR-5 (IAEA, Vienna, 2011).
4. International Atomic Energy Agency, *Combined Methods for Liquid Radioactive Waste Treatment*, IAEA-TECDOC-1336 (IAEA, Vienna, 2003).
5. International Atomic Energy Agency, *International Safeguards in the Design of Radioactive Waste Management Programmes*, IAEA Nuclear Energy Series No. NW-T-1.28 (IAEA, Vienna, 2025). <https://doi.org/10.61092/iaea.gzc8-slxn>
6. N. A. Nekrasova, V. V. Milyutin, V. O. Kaptakov, and E. A. Kozlitin, Inorganic sorbents for wastewater treatment from radioactive contaminants, *Inorganics* **11**, 126 (2023). <https://doi.org/10.3390/inorganics11030126>
7. K. G. Legkikh and V. B. Smykov, Innovative technologies for immobilizing the sodium primary coolant of fast neutron reactors and processing liquid radioactive waste generated during reactor operation, *At. Energy* **137**, 129–135 (2024). <https://doi.org/10.1007/s10512-025-01186-z>
8. N. C. Hyatt and M. I. Ojovan, Special Issue: Materials for nuclear waste immobilization, *Materials* **12**, 3611 (2019). <https://doi.org/10.3390/ma12213611>
9. V. M. Troyanov and A. A. Kamaev, Evolution of fast reactors: The role of a BN-350 reactor, *At. Energy* **136**, 222–232 (2024). <https://doi.org/10.1007/s10512-024-01155-y>
10. Y. V. Nosov, A. V. Rovneiko, O. L. Tashlykov *et al.*, Decommissioning features of BN-350, -600 fast reactors, *At. Energy* **125**, 219–223 (2019). <https://doi.org/10.1007/s10512-019-00470-z>
11. E. Bатырбек, V. Vityuk, D. Zarva, and M. Sharipov, Conceptual view of the implementation of the nuclear energy program in the Republic of Kazakhstan, *Energies* **17**, 5788 (2024). <https://doi.org/10.3390/en17225788>
12. A. Shaimerdenov, D. Sairanbayev, Sh. Gizatulina, A. Nessipbay, Zh. Bugubay, D. Nugumanov, and S. Sakhiyev, WWR-K reactor LEU core design optimization for improving the experimental characteristics, *Ann. Nucl. Energy* **195**, 110174 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.anucene.2023.110174>
13. R. A. Irkimbekov, A. S. Surayev, G. A. Vityuk, O. M. Zhanbolatov, Z. B. Kozhabaev, S. V. Bedenko, N. Ghal-Eh, and A. D. Vurim, Study on an open fuel cycle of IVG.1M research reactor operating with LEU-fuel, *Nucl. Eng. Technol.* **55**, 1439–1447 (2023). <https://doi.org/10.1016/j.net.2022.12.012>
14. E. Bатырбек, V. Vityuk, A. Vurim, and G. Vityuk, Experimental opportunities and main results of the impulse graphite reactor use for research in safety area, *Ann. Nucl. Energy* **182**, 109582 (2023). <https://doi.org/10.1016/j.anucene.2022.109582>
15. E. Bатырбек, M. Khasenov, M. Skakov, Y. Gordienko, K. Samarkhanov, A. Kotlyar, A. Miller, and V. Bochkov, High-energy tritium ion and α -particle release from the near-surface layer of lithium during neutron irradiation in the nuclear reactor core, *Fusion Sci. Technol.* **80**, 520–529 (2024). <https://doi.org/10.1080/15361055.2023.2229682>
16. K. Samarkhanov, M. Khasenov, E. Bатырбек, Y. Gordienko, Y. Baklanova, I. Kenzhina, *et al.*, Optical radiation from the sputtered species under excitation of ternary mixtures of noble gases by the ${}^6\text{Li}(n,\alpha){}^3\text{H}$ nuclear reaction products, *Eurasian Chem.-Technol. J.* **23**, 95–102 (2021). <https://doi.org/10.18321/ectj1079>

17. Y. Ponkratov, E. Bатырбеков, M. Khasenov, K. Samarkhanov, and Ye. Chikhray, Application of high-energy tritium ions and alpha particles formed in $6\text{Li}(n,\alpha)\text{T}$ nuclear reaction to excite the luminescence of inert gas mixtures, *Fusion Sci. Technol.* **77**, 327–332 (2021). <https://doi.org/10.1080/15361055.2021.1887714>
18. K. K. Samarkhanov, Y. Yu. Baklanova, O. S. Bukina, V. V. Baklanov, Y. T. Koyanbayev, I. M. Kukushkin, I. M. Bolshinsky, and K. J. Bateman, Development of the technological process for the IGR reactor's highly-enriched irradiated uranium-graphite fuel immobilization, *J. Nucl. Mater.* **610**, 155801 (2025). <https://doi.org/10.1016/j.jnucmat.2025.155801>
19. K. Toleubekov, V. Baklanov, A. Akayev, M. Bekmuldin. Modeling the process of decay heat imitation in the corium at the «Lava-B» facility. *Recent Contributions to Physics*, **81**(2), 97–106 (2022). <https://doi.org/10.26577/RCPH.2022.v81.i2.012>
20. M. Skakov, V. Baklanov, I. Kukushkin, K. Toleubekov, M. Bekmuldin, A. Akaev, M. Azbergenov, Y. Daultekhanov, and A. Toktaushev, Investigation of the interaction between corium and metal-coolers at the VCG-135 test bench in the conditions of a severe accident, *Nucl. Eng. Des.* **424**, 113296 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2024.113296>
21. N. Mukhamedov, V. Baklanov, M. Moldagulov, K. Toleubekov, A. Surayev, A. Yagudin, and S. Kanatnikov, The BN-350 reactor decommissioning: Quantitative analysis and prospects for solid radioactive waste management, *Energies* **18**, 4651 (2025). <https://doi.org/10.3390/en18174651>
22. N. Mukhamedov, K. Toleubekov, G. Vityuk, M. Bekmuldin, and S. Dolzhikov, Decommissioning of the BN-350 fast neutron reactor: History review and current status, *Energies* **18**, 3486 (2025). <https://doi.org/10.3390/en18133486>
23. Ye. T. Koyanbayev, M. K. Skakov, E. G. Bатырбеков, I. I. Deryavko, Ye. Ye. Sapatayev, and Ye. A. Kozhahmetov, The forecasting of corrosion damage of structural materials during dry long-term storage of RD BN-350 SNF with CC-19 SFA, *Sci. Technol. Nucl. Inst.* (2019). <https://doi.org/10.1155/2019/1293060>
24. Ye. T. Koyanbayev, M. K. Skakov, D. A. Ganovichev, Ye. A. Martynenko, and A. A. Sitnikov, Simulation of the thermal conditions of cask with fuel assemblies of BN-350 reactor for dry storage, *Sci. Technol. Nucl. Inst.* (2019). <https://doi.org/10.1155/2019/3045897>
25. Union Perlite LLP, Company profile. Available at: <https://perlite.all.biz/contacts>
26. GOST 10832-2009. Perlite expanded sand and crushed stone. Technical specification.
27. Y. Ponkratov, V. Bochkov, K. Samarkhanov, I. Karambayeva, and S. Askerbekov, Methodology of corrosion testing of nuclear and fusion reactors materials using TGA/DSC and MS complex techniques, *Eurasian Chem.-Technol. J.* **21**, 35 (2019). <https://doi.org/10.18321/ectj787>
28. Yu. V. Ponkratov, K. K. Samarkhanov, V. V. Baklanov, Yu. N. Gordienko, I. E. Kenzhina, V. S. Bochkov, Ye. Yu. Tulubayev, N. A. Orazgaliyev, and E. Saparbek, Investigation of the interaction of liquid tin-lithium alloy with austenitic stainless steel at high temperatures, *Fusion Eng. Des.* **191**, 113560 (2023). <https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2023.113560>
29. T. Kulsartov, K. Samarkhanov, V. Bochkov, Ye. Kenzhin, Yu. Ponkratov, I. Kenzhina, Zh. Zaurbekova, Ye. Sapatayev, S. Askerbekov, A. Yelishenkov, S. Udartsev, High-temperature corrosion testing of titanium beryllides in the presence of water vapor and oxygen, *J. Nucl. Mater.* **600**, 155294 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.jnucmat.2024.155294>
30. Wang J., Lu X., He C. *et al.* Mechanical properties and microscopic characterization of waste perlite powder as supplementary cementitious material. *Sci Rep* **14**, 21963 (2024). <https://doi.org/10.1038/s41598-024-71968-1>
31. Z. Khoshraftar, H. Masoumi, A. Ghaemi. On the performance of perlite as a mineral adsorbent for heavy metals ions and dye removal from industrial wastewater: A review of the state of the art. *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering* **8**, 100385 (2023). <https://doi.org/10.1016/j.cscee.2023.100385>
32. Jin-Tao Guo, Ya-Qian Wei, Sheng-Li Chen, Wei Sun, Ting-Ting Fan, Ming-Ri Xu, and Chang-Cheng Zhang, Measurement of pore diffusion factor of porous solid materials, *Pet. Sci.* **19**, 1897 (2022). <https://doi.org/10.1016/j.petsci.2022.04.008>

Сведения об авторах:

Юрий Гордиенко (автор-корреспондент) – заведующий лабораторией, Филиал института атомной энергии Национального ядерного центра Республики Казахстан, (Курчатов, Казахстан, e-mail: gordienko@nnc.kz).

Вадим Бочков – инженер I-й категории, Филиал института атомной энергии Национального ядерного центра Республики Казахстан, (Курчатов, Казахстан, e-mail: bochkovv@nnc.kz).

Амина Ноканова – инженер, Филиал института атомной энергии Национального ядерного центра Республики Казахстан, (Курчатов, Казахстан, e-mail: nokanovaamina@nnc.kz).

Ольга Букина – начальник лаборатории, Филиал института атомной энергии Национального ядерного центра Республики Казахстан, (Курчатов, Казахстан, e-mail: bukina@nnc.kz).

Юлия Бакланова – начальник отдела, Филиал института атомной энергии Национального ядерного центра Республики Казахстан, (Курчатов, Казахстан, e-mail: Basalai@nnc.kz).

Эльдана Сапарбек – младший научный сотрудник, Филиал института атомной энергии Национального ядерного центра Республики Казахстан, (Курчатов, Казахстан, e-mail: Saparbek@nnc.kz).

Авторлар туралы мәлімет:

Юрий Гордиенко (автор-корреспондент) – зертхана меңгерушісі, Қазақстан Республикасы Ұлттық ядролық орталығының Атом энергиясы институтының филиалы, (Курчатов, Қазақстан, e-mail: gordienko@nnc.kz).

Вадим Бочков – I-і санатты инженер, Қазақстан Республикасы Ұлттық ядролық орталығының Атом энергиясы институтының филиалы, (Курчатов, Қазақстан, e-mail: bochkovv@nnc.kz).

Әмина Ноқанова – инженер, Қазақстан Республикасы Ұлттық ядролық орталығының Атом энергиясы институтының филиалы, (Курчатов, Қазақстан, e-mail: nokanovaamina@nnc.kz).

Ольга Букина – зертхана меңгерушісі, Қазақстан Республикасы Ұлттық ядролық орталығының Атом энергиясы институтының филиалы, (Курчатов, Қазақстан, e-mail: bukina@nnc.kz).

Юлия Бакланова – бөлім меңгерушісі, Қазақстан Республикасы Ұлттық ядролық орталығының Атом энергиясы институтының филиалы, (Курчатов, Қазақстан, e-mail: Basalai@nnc.kz).

Эльдана Сапарбек – кіші ғылыми қызметкер, Қазақстан Республикасы Ұлттық ядролық орталығының Атом энергиясы институтының филиалы, (Курчатов, Қазақстан, e-mail: Saparbek@nnc.kz).

Information about authors:

Yuriy Gordienko (corresponding author) – Head of laboratory, Institute of Atomic Energy Branch of the National Nuclear Center of the Republic of Kazakhstan, (Kurchatov, Kazakhstan, e-mail: gordienko@nnc.kz).

Vadim Bochkov – 1st category engineer, Institute of Atomic Energy Branch of the National Nuclear Center of the Republic of Kazakhstan – (Kurchatov, Kazakhstan, e-mail: bochkovv@nnc.kz).

Amina Nokanova – Engineer, Institute of Atomic Energy Branch of the National Nuclear Center of the Republic of Kazakhstan, (Kurchatov, Kazakhstan, e-mail: nokanovaamina@nnc.kz).

Olga Bukina – Head of laboratory, Institute of Atomic Energy Branch of the National Nuclear Center of the Republic of Kazakhstan, (Kurchatov, Kazakhstan, e-mail: bukina@nnc.kz).

Yuliya Baklanova – Head of department, Institute of Atomic Energy Branch of the National Nuclear Center of the Republic of Kazakhstan, (Kurchatov, Kazakhstan, e-mail: Basalai@nnc.kz).

Eldana Saparbek – junior researcher, Institute of Atomic Energy Branch of the National Nuclear Center of the Republic of Kazakhstan, (Kurchatov, Kazakhstan, e-mail: Saparbek@nnc.kz).

История статьи: постуила: 22 февраля 2026; после доработки 14 апреля; принята: 21 мая 2026.

Мақала тарихы: түсті: 22 ақпан 2026; түзетілді: 14 сәуір; қабылданды: 21 мамыр 2026.

Article history: received: 22 February 2026; revised: 14 April; accepted: 21 May 2026.