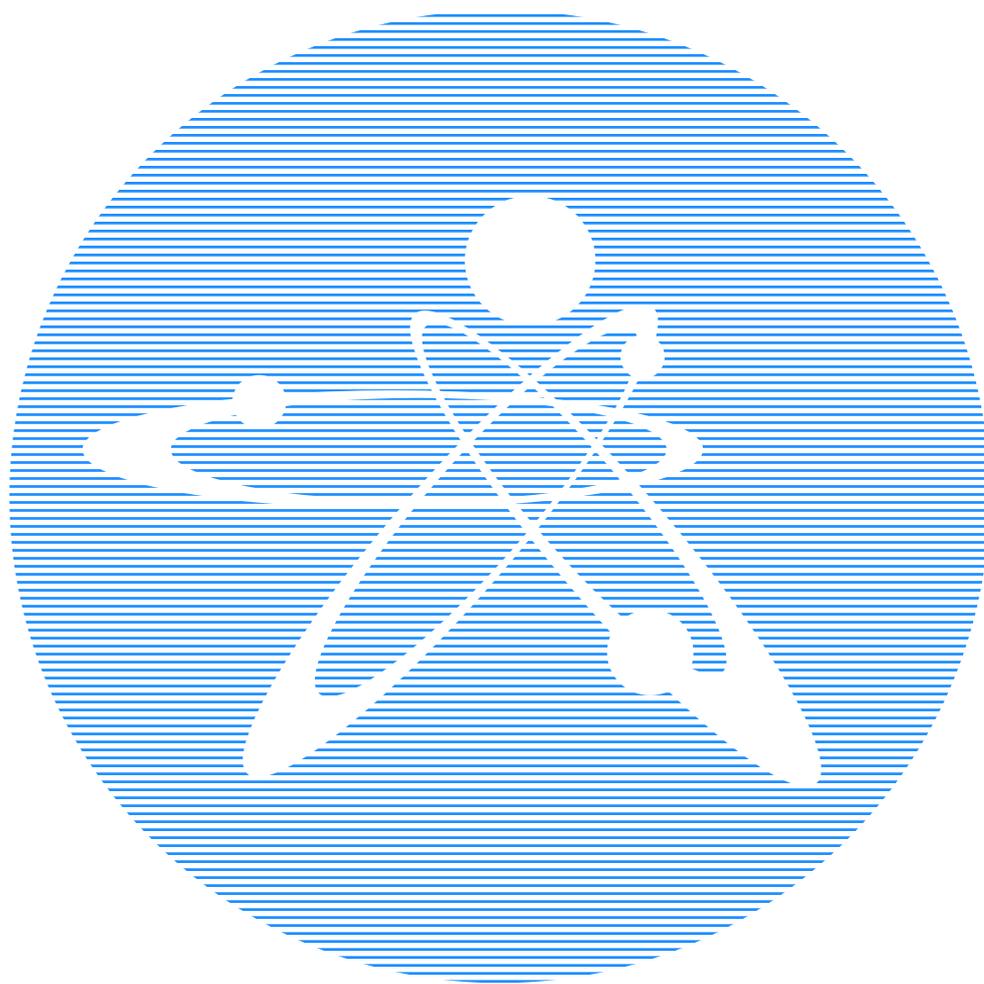


2025
ВЫПУСК 1

ISSN 1729-7516

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ
Вестник

ПЕРИОДИЧЕСКИЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ
НАЦИОНАЛЬНОГО ЯДЕРНОГО ЦЕНТРА
РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН



Вестник НЯЦ РК

ПЕРИОДИЧЕСКИЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ
НАЦИОНАЛЬНОГО ЯДЕРНОГО ЦЕНТРА РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН

ВЫПУСК 1(101), МАРТ 2025

Издается с января 2000 г.

ГЛАВНЫЙ РЕДАКТОР – д.ф.-м.н., профессор БАТЫРБЕКОВ Э.Г.

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ: д.ф.-м.н. СКАКОВ М.К. – заместитель главного редактора,
к.б.н. АЙДАРХАНОВ А.О., д.ф.-м.н. БУРТЕБАЕВ Н.Т., д.т.н. ВИЕЛЕБА В. (Польша), к.ф.-м.н. ВИТЮК В.А.,
к.ф.-м.н. ВУРИМ А.Д., д.т.н. ГРАДОБОЕВ А.В. (Россия), д.ф.-м.н. КОПНИЧЕВ Ю.Ф. (Россия),
д.ф.-м.н. МИХАЙЛОВА Н.Н., д.ф.-м.н. СОКОЛОВА И.Н., д.ф.-м.н. ТАЖИБАЕВА И.Л.,
Prof. Dr. Yoichi FUJII-E (Япония), PhD Takahiro HAYASHI (Япония)

ҚР ҰЯО Жаршысы

ҚАЗАҚСТАН РЕСПУБЛИКАСЫ ҰЛТТЫҚ ЯДРОЛЫҚ ОРТАЛЫҒЫНЫҢ
МЕРЗІМДІК ҒЫЛЫМИ-ТЕХНИКАЛЫҚ ЖУРНАЛЫ

1(101) ШЫҒАРЫМ, НАУРЫЗ, 2025 ЖЫЛ

NNC RK Bulletin

RESEARCH AND TECHNOLOGY REVIEW
NATIONAL NUCLEAR CENTER OF THE REPUBLIC OF KAZAKHSTAN

ISSUE 1(101), March 2025

Журнал «Вестник НЯЦ РК» входит в перечень научных изданий, рекомендуемых Комитетом по обеспечению качества в сфере науки и высшего образования Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан для публикации основных результатов научной деятельности.

«ҚР ҰЯО жаршысы» журналы ғылыми қызметтің негізгі нәтижелерін жариялау үшін Қазақстан Республикасы Ғылым және жоғары білім министрлігінің Ғылым және жоғары білім саласындағы сапаны қамтамасыз ету комитеті ұсынған ғылыми басылымдар тізбесіне кіреді.

The Journal “NNC RK Bulletin” is included in the list of scientific publications recommended by Committee for Quality Assurance in the Field of Science and Higher Education of the Ministry of Science and Higher Education of the Republic of Kazakhstan for the publication of the main results of scientific activities.

СОДЕРЖАНИЕ

ИСКУССТВЕННЫЕ РАДИОНУКЛИДЫ В РАСТИТЕЛЬНОМ ПОКРОВЕ В МЕСТАХ ПРОВЕДЕНИЯ ИСПЫТАНИЙ БОЕВЫХ РАДИОАКТИВНЫХ ВЕЩЕСТВ НА ПЛОЩАДКЕ «4» Н. В. Ларионова, А. В. Топорова, П. Е. Кривицкий, В. В. Полевик, А. Е. Кундузбаева, А. О. Айдарханов	5
TECHNICAL STUDY OF ENGINEERING COMMUNICATIONS BY ULTRASONIC DEFECTOSCOPY G. N. Sembayeva, I. E. Aldabergen	12
РАЗРАБОТКА И ИСПЫТАНИЕ СИСТЕМЫ ДИАГНОСТИКИ НА ОСНОВЕ ТРОЙНОГО ЗОНДА ЛЕНГМЮРА НА ПЛАЗМЕННО-ПУЧКОВОЙ УСТАНОВКЕ А. Ж. Миниязов, И. А. Соколов, Ә. Ж. Қайырбекова, Т. Р. Туленбергенов, Ғ. Қ. Жанболатова	21
ДАЛА ӨРТІНЕ ҚАРСЫ ОПТИКАЛЫҚ ЖӘНЕ ЖЫЛУ МОДЕЛЬДЕРІ: ҰҰА МЕН ТЕЛЕМЕТРИЯ ИНТЕГРАЦИЯСЫ Х. Молдамурат, Д. М. Калманова, Ө. К. Әбдірашев, Ғ. А. Әнуар, Ө. Ақан	28
ИЗУЧЕНИЕ ВЛИЯНИЯ ВЫБОРА СВЯЗУЮЩЕГО МАТЕРИАЛА НА ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА АНОДОВ НА ОСНОВЕ LaNi₃ С. Д. Мәлік, С. К. Әбдімомын, М. К. Скаков, Е. Т. Коянбаев, А. Ж. Миниязов, Ф. И. Мальчик	38
ОПТИМИЗАЦИЯ ЗАДАНИЯ МНОГОМЕРНОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЭНЕРГОВЫДЕЛЕНИЯ В ОБЪЕКТЕ ИСПЫТАНИЯ ДЛЯ CFD МОДЕЛИРОВАНИЯ А. С. Сураев, Е. А. Қабдылқақов, О. М. Жанболатов, Ғ. А. Витюк, Д. М. Секен	46
СЕЙСМОЛОГИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ЛЕДНИКОВЫХ ПРОЦЕССОВ ВЫСОТНОГО ТЯНЬ-ШАНЯ А. Е. Шокпарбай, Н. Н. Михайлова	53
МАГНИЙ НЕГІЗІНДЕГІ ҰНТАҚ ҚОСПАСЫНЫҢ МОРФОЛОГИЯСЫНА МЕХАНОСИНТЕЗ ПАРАМЕТРЛЕРІНІҢ ӘСЕРІН БАҒАЛАУ Н. М. Мухамедова, А. Ж. Миниязов, О. Өкен, Ж. Н. Оспанова, А. А. Сабыртаева, К. С. Шайкиева, Т. Д. Ахмеди	64
ИЗУЧЕНИЕ ГЕОЛОГО-ГЕОФИЗИЧЕСКИХ И СЕЙСМОЛОГИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ ДЛЯ ВЫБОРА МЕСТА НОВОЙ СЕЙСМИЧЕСКОЙ СТАНЦИИ ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ СЕЙСМИЧНОСТИ ЗАПАДНОГО КАЗАХСТАНА Ә. А. Исағали, Ғ. К. Умирова, А. Е. Великанов	72
МОДЕЛИРОВАНИЕ ЕВРОПЕЙСКОГО РЕАКТОРА ПОД ДАВЛЕНИЕМ (EPR) С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ КОДА MCNP У. А. Жумадилова, И. В. Прозорова, А. К. Мухамедиев, А. А. Прозоров, Ю. А. Попов, Б. С. Медетбеков, Р. Р. Сабитова, С. Н. Светачев	80
CrNiZ (Z=Sb, Sn) ЖАРТЫЛАЙ ГЕЙСЛЕР ҚОРЫТПАЛАРЫНЫҢ ҚҰРЫЛЫМДЫҚ ЖӘНЕ ЭЛЕКТРОНДЫҚ ҚАСИЕТТЕРІН АВ ІНІТІО ЕСЕПТЕУЛЕРІ НЕГІЗІНДЕ ЗЕРТТЕУ Н. С. Солтанбек, Н. А. Мерәлі, А. У. Абуова, Ф. У. Абуова, Ж. Е. Зәкиева, Ө. К. Әбдірашев, А. Б. Базарбек, Ғ. Д. Қабдрахимова, Т. М. Инербаев	90
LUMINESCENCE AND THE FORMATION OF ELECTRON-HOLE TRAPPING CENTERS IN CaSO₄-Bi PHOSPHOR R. K. Shamiyeva, T. N. Nurakhmetov, Z. M. Salikhodzha, T. T. Alibay, B. M. Sadykova, A. Zh. Kainarbay, K. B. Zhangylyssov, A. S. Nurpeissova	96
МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ СТАРЕНИЯ КОРИУМА Ю. Ю. Бакланова, О. С. Букина, В. В. Бакланов	104
ИССЛЕДОВАНИЕ УСТОЙЧИВОСТИ ФАЗОВОГО СОСТАВА И СТРУКТУРНЫХ ПАРАМЕТРОВ НИТРИДНЫХ КЕРАМИК К ТЕРМИЧЕСКИМ ВОЗДЕЙСТВИЯМ А. Л. Козловский	113

ИССЛЕДОВАНИЯ ВЛИЯНИЯ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ФАКТОРОВ НА СКОРОСТЬ НАКОПЛЕНИЯ СТРУКТУРНЫХ ПОВРЕЖДЕНИЙ В КОМПОЗИТНЫХ КЕРАМИКАХ	
А. Л. Козловский, С. Б. Азамбаев, М. Е. Кенжина, А. У. Толенова	121
ИЗУЧЕНИЕ КИНЕТИКИ СТРУКТУРНЫХ ПОВРЕЖДЕНИЙ В КОМПОЗИТНЫХ CER-CER КЕРАМИКАХ ПРИ ОБЛУЧЕНИИ ТЯЖЕЛЫМИ ИОНАМИ, СРАВНИМЫМИ С ОСКОЛКАМИ ДЕЛЕНИЯ ЯДЕРНОГО ТОПЛИВА	
Ш. Г. Гиниятова, А. Л. Козловский, Д. И. Шлимас	132
ВЛИЯНИЕ ДОПИРОВАНИЯ Rh НА АКТИВНОСТЬ РЕАКЦИИ ВЫДЕЛЕНИЯ КИСЛОРОДА НА ПОВЕРХНОСТЯХ BaTiO₃(001)	
А. У. Абуова, У. Ж. Толеген, Ф. У. Абуова, Т. М. Инербаев, С. А. Нуркенов, Ж. Е. Зэкиева, Г. А. Каптагай	140
DEVELOPMENT AND CREATION OF RESEARCH CELLS FOR SOLID OXIDE FUEL CELLS	
S. Opaikai, K. A. Kuterbekov, K. Zh. Bekmyrza, A. M. Kabyshev, M. M. Kubenova, N. K. Aydarbekov, Zh. Zhumadilova	
ОЦЕНКА ВОЗДЕЙСТВИЯ Sr-90 НА ПРОВОДЯЩИЕ ТКАНИ ФАСОЛИ ОБЫКНОВЕННОЙ (PHASEOLUS VULGARIS)	
Е. С. Сысоева, Е. Н. Поливкина	155
МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ КОНТРОЛЯ БЕЗОПАСНОСТИ НА АТОМНЫХ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЯХ	
Е. М. Елекеев, Б. П. Степанов	161
ИССЛЕДОВАНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ РАДИОУГЛЕРОДА В ПОЧВЕ ЛЕСНЫХ ЭКОСИСТЕМ РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН	
А. К. Айдарханова, А. А. Сарсенова, А. С. Мамырбаева, Н. В. Ларионова, Ж. Е. Тлеуканова, А. О. Айдарханов	167
PRELIMINARY RESULTS OF THE STUDY OF SHELL EFFECTS IN MASS AND ENERGY DISTRIBUTIONS OF FISSION FRAGMENTS OF ²⁴¹Am* IN ²⁴⁰Pu(p,f) REACTION AT INCIDENT PROTON ENERGY OF 7 MeV	
A. N. Pan, D. K. Alimov, K. V. Kovalchuk, N. Burtebayev, D. M. Janseitov, R. K. Kosherbayeva	175
Исправление к статье «ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СТАБИЛИЗИРУЮЩИХ ДОБАВОК ДЛЯ НАПРАВЛЕННОЙ МОДИФИКАЦИИ И УПРОЧНЕНИЯ Nd₂Zr₂O₇ КЕРАМИК»	
А. Л. Козловский, М. Б. Кабиев, И. Е. Кенжина, А. У. Толенова	179
СПИСОК АВТОРОВ	180

<https://doi.org/10.52676/1729-7885-2025-1-5-11>
УДК 581.5:631.438.2:620.179.111.4:539.16 (574.41)

ИСКУССТВЕННЫЕ РАДИОНУКЛИДЫ В РАСТИТЕЛЬНОМ ПОКРОВЕ В МЕСТАХ ПРОВЕДЕНИЯ ИСПЫТАНИЙ БОЕВЫХ РАДИОАКТИВНЫХ ВЕЩЕСТВ НА ПЛОЩАДКЕ «4»

Н. В. Ларионова*, А. В. Топорова, П. Е. Кривицкий, В. В. Полевик, А. Е. Кундузбаева, А. О. Айдарханов

Филиал «Институт радиационной безопасности и экологии» РГП НЯЦ РК, Курчатов, Казахстан

* E-mail для контактов: larionova@nnc.kz

В статье представлены данные о содержании искусственных радионуклидов ^{241}Am , ^{137}Cs , ^{90}Sr , $^{239+240}\text{Pu}$ в растительном покрове на площадке «4» в местах испытания боевых радиоактивных веществ (БРВ). Превышение предельно-допустимого уровня радиоактивного загрязнения кормовых растений отмечается для ^{90}Sr , содержание которого варьирует от 7,6 до 18000 Бк/кг. Максимальное значение суммарной мощности дозы для травянистой растительности от исследуемых радионуклидов составляет 220 мкГр/сут, при этом основной вклад вносит радионуклид ^{90}Sr .

Ключевые слова: Семипалатинский испытательный полигон (СИП), боевые радиоактивные вещества (БРВ), искусственные радионуклиды, растительный покров, удельная активность.

ВВЕДЕНИЕ

Семипалатинский испытательный полигон (СИП) был одним из крупнейших полигонов для проведения ядерных испытаний – его площадь около 18500 км². Всего за период функционирования на его территории проведено 340 подземных ядерных взрывов, 30 наземных и 86 воздушных [1]. Каждый вид испытаний характеризовался определенным количеством и составом радионуклидов, образованных в процессе ядерного взрыва, площадью их распространения и локализацией на различных участках, а в дальнейшем и формами нахождения радионуклидов в почвах.

Уникальным радионуклидным составом отличаются места испытаний боевых радиоактивных веществ (БРВ). Удельная активность радионуклида ^{90}Sr в почвах данной территории достигает нескольких миллионов Бк/кг, тогда как содержание остальных радионуклидов значительно ниже, что, по всей видимости, обусловлено рецептурой используемых в испытаниях веществ. Испытания БРВ представляли собой их рассеяние путем подрыва отдельных снарядов, бомбардировки участков минометными снарядами, сброса бомб с бомбардировщиков или распыления БРВ с самолетов. БРВ – это жидкие или порошкообразные рецептуры, изготовленные либо из отходов радиохимического производства, либо путем облучения, специально подобранных веществ, нейтронами работающего атомного реактора. Их удельная активность колебалась от десятых долей до нескольких кюри на литр [2, 3].

Испытания БРВ проводились на 2-х площадках – «4» и «4а» (рисунок 1). Детальные исследования содержания искусственных радионуклидов в почвенно-растительном покрове в местах проведения испытаний БРВ ранее были выполнены для территории площадки «4а» [4]. В данной работе приведены результаты исследований накопления искусственных радионуклидов растениями на площадке «4».

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Проведение экспедиционных работ

Точки отбора проб выбирались на основании результатов площадного обследования по суммарной активности гамма-импульсов и были приурочены к участкам с повышенными значениями [3]. Поскольку гамма-спектрометром невозможно напрямую определить наличие бета-излучающих радионуклидов, к которым относится ^{90}Sr , преобладающий на испытательной площадке, идентификация участков радиоактивного загрязнения проводилась по суммарной активности гамма-импульсов по всему спектру, куда в свою очередь входит тормозное гамма-излучение, возникающее при взаимодействии бета-частицы с окружающей средой.

Изучение растительного покрова проводилось отдельными методами геоботанического описания с выделением основных экосистем и видового состава растений [5]. Для определения содержания в растительном покрове искусственных радионуклидов ^{241}Am , ^{137}Cs , ^{90}Sr и $^{239+240}\text{Pu}$ было заложено 16 исследовательских площадок – точек сопряженного отбора проб почв и растений (рисунок 2). На каждой площадке произведен отбор наземной части растений (площадь отбора ~ 1–2 м²), а также пробы почвы для оценки мощности дозы внешнего облучения. Проба растений представляла собой смешанный образец степного разнотравья с приблизительно одинаковым доминированием ковыля (*Stipa capillata*, *S. sareptana*, *S. lessingiana*), типчака (*Festuca valesiaca*) и полыни (*Artemisia gracileccens*, *A. frigida*). Почва отобрана методом «конверта» на глубину 5 см. Масса каждой пробы составляла 200–300 г. Для первичной оценки наличия радиоактивного загрязнения в соответствии со стандартными методиками [6] в каждой точке выполнялись измерения радиационных параметров – плотности потока β-частиц и мощности эквивалентной дозы (МЭД).

**ИСКУССТВЕННЫЕ РАДИОНУКЛИДЫ В РАСТИТЕЛЬНОМ ПОКРОВЕ В МЕСТАХ ПРОВЕДЕНИЯ ИСПЫТАНИЙ
БОЕВЫХ РАДИОАКТИВНЫХ ВЕЩЕСТВ НА ПЛОЩАДКЕ «4»**

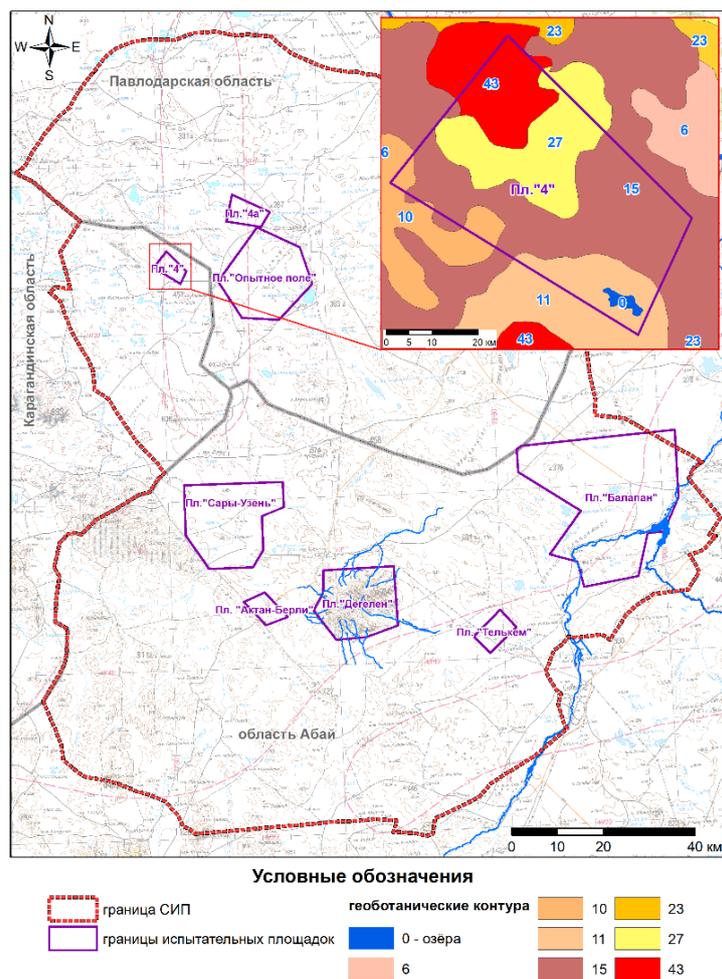


Рисунок 1. Территория СИП и основные экосистемы на площадке «4»

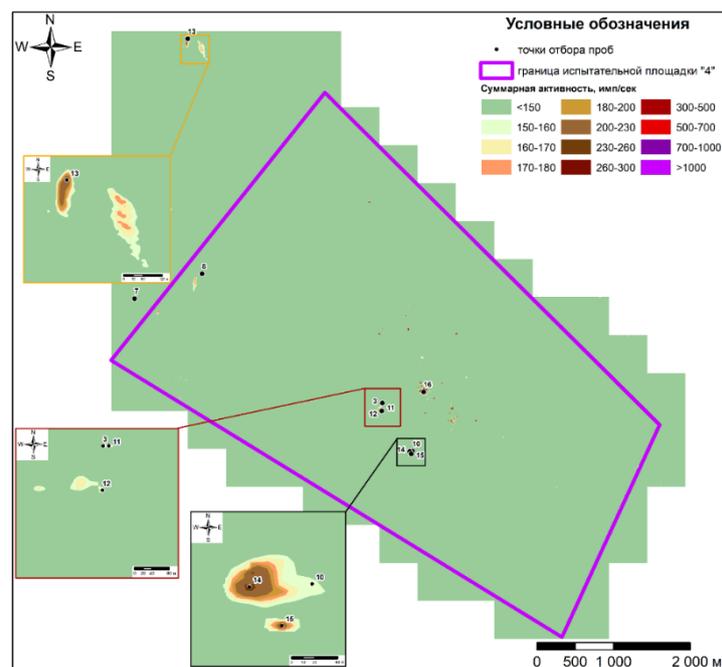


Рисунок 2. Точки сопряженного отбора проб почв и растений на площадке «4»

Пробоподготовка растений и почв

Пробы растительности промывали и ополаскивали дистиллированной водой 2–3 раза, просушивали в сушильном шкафу при температуре 80–100 °С, измельчали на лабораторной мельнице и обугливали в муфельной печи или на электроплитах. Далее в муфельной печи проводили озоление. Первоначально температуру повышали до 200 °С в течение 50–60 минут, после чего устанавливали предельную температуру озоления: для определения ^{137}Cs – 400 °С, ^{90}Sr – 550 °С, ^{241}Am и $^{239+240}\text{Pu}$ – 650 °С. Готовая зола просеивалась через сито (1 мм) для удаления не зольного остатка, взвешивалась, определялся коэффициент озоления. Почву высушивали в сушильном шкафу до воздушно-сухого состояния при температуре 60–70 °С. После удаления крупных камней и включений (корней растений) пробы взвешивали на технических весах, перемешивали, растирали в фарфоровой ступке и просеивали через сито с диаметром отверстий 1 мм.

Радионуклидный анализ

Анализ по измерению удельной активности радионуклидов ^{241}Am , ^{137}Cs , ^{90}Sr и $^{239+240}\text{Pu}$ в пробах почвы и растений проводился на поверенном оборудовании в соответствии со стандартизованными методическими указаниями [7, 8]. Определение ^{137}Cs и ^{241}Am проводили на гамма-спектрометре Canberra GX-2020, ^{90}Sr и $^{239+240}\text{Pu}$ – радиохимическим выделением с последующим измерением на бета-спектрометре TRI-CARB 2900 TR и альфа-спектрометре Canberra (мод. 7401), соответственно. Для определения ^{90}Sr также применяли бета-спектрометр «Прогресс». Концентрацию радионуклидов в растениях определяли в золе, с последующим пересчетом на сухое вещество. Погрешность измерений для ^{137}Cs и ^{241}Am не превышала 10–20%, ^{90}Sr – 15–25%, $^{239+240}\text{Pu}$ – 30%.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

По результатам проведенного геоботанического описания установлено, что основную часть территории площадки «4» занимают экосистемы низких мелкосопочников, делювиально-пролювиальных равнин и антропогеннопроизводные экосистемы.

Экосистемы низких мелкосопочников (15) представлены сочетаниями серий сообществ: кустарниково-петрофитно-разнотравных (*Orostachys spinosa*, *Sedum hybridum*, *Ephedra distachya*, *Ajania fruticulosa*, *Caragana pumila*, *Atraphaxis frutescens*) на малоразвитых щебнистых светло-каштановых почвах; маршаловопольно-типчаково-тырсовых (*Stipa capillata*, *Festuca valesiaca*, *Artemisia marschalliana*), иногда с участием *Spiraea hypericifolia*, *Caragana pumila*, *C. Frutex* на светло-каштановых щебнистых почвах; кустарниково-злаково-разнотравных (*Medicago falcata*, *Phlomis tuberosa*, *Potentilla bifurca*, *Leonurus glaucescens*, *Poa angustifolia*, *Leymus ramosus*, *Spiraea hypericifolia*, *Halimodendron halodendron*) на лугово-каштановых почвах межсочных понижений; про-

ценозов с доминированием *Artemisia sieversiana*, *A. austriaca*, *A. scoparia*, *Leymus angustus*, *Achillea asiatica*, *Potentilla bifurca*, *Melilotus dentatus*, *Verbascum phoenicum*, *Chenopodium acuminatum*, *Dodartia orientalis* на нарушенных участках.

Экосистемы делювиально-пролювиальных равнин (27) представлены группами сообществ: холоднопопынно-типчаково-тырсовых (*Stipa sareptana*, *Festuca valesiaca*, *Artemisia frigida*); сублессингиановопольно-типчаково-тырсовых (*Stipa sareptana*, *Festuca valesiaca*, *Artemisia sublessingiana*) и типчаково-ковылково-тырсово-разнопопынных (*Artemisia marschalliana*, *A. sublessingiana*, *Stipa sareptana*, *S. lessingiana*, *Festuca valesiaca* на светло-каштановых щебнистых почвах плакорных участков; в комплексе с микропоясным экологическим рядом сообществ: тростниковых (*Phragmites australis*) – бескильцевых (*Puccinellia distans*) – солодково-волоснецовых (*Leymus multicaulis*, *Glycyrrhiza uralensis*) – чиевых (*Achnatherum splendens*) – галмионовых (*Halimione verrucifera*) – камфоросмовых (*Camphorosma monspeliaca*) – коклековых (*Atriplex cana*) – чернопопынных (*Artemisia pauciflora*) по западинам и прощелками с доминированием *Artemisia scoparia*, *A. Sieversiana*, *Petrosimonia sibirica*, *Dodartia orientalis*, *Ceratocarpus arenarius* на нарушенных участках.

Антропогеннопроизводные экосистемы (43) включают группировки и сообщества с участием *Elaeagnus oxycarpa*, *Rosa majalis*, *Vexibia alopecuroides*, *Ciclochena xantifolia*, *Chenopodium album*, *Leymus angustus* вокруг урбанизированных территорий (жилых и заброшенных строений).

Небольшая часть территории представлена экосистемами высоких мелкосопочников с сериями сообществ: петрофитноразнотравно-спирейно-карагановых (*Caragana pumila*, *Spiraea hypericifolia*, *Patrinia intermedia*, *Sedum hybridum*, *Orostachys spinosa*, *Veronica pinnata*) по вершинам; дерновиннозлаково-кустарниковых (*Caragana pumila*, *Spiraea hypericifolia*, *Festuca valesiaca*, *Stipa lessingiana*), холоднопопынно-типчаково-ковыльных (*Stipa capillata*, *S. Sareptana*, *S. lessingiana*, *Festuca valesiaca*, *Artemisia frigida*, *Carex supina*, *Galim ruthenicum*) и караганово-холоднопопынных (*Artemisia frigida*, *Caragana pumila*) по склонам сопок на светло-каштановых щебнистых почвах (10), а также сериями сообществ: петрофитноразнотравно-спирейно-карагановых (*Caragana pumila*, *Spiraea hypericifolia*, *Patrinia intermedia*, *Sedum hybridum*, *Orostachys spinosa*, *Veronica pinnata*) по вершинам; ковылково-типчаково-тырсовых (*Stipa sareptana*, *Festuca valesiaca*, *Stipa lessingiana*, *Artemisia frigida*, *Carex supina*, *Galim ruthenicum*) по склонам в сочетании с комплексом сообществ: чернопопынных (*Artemisia pauciflora*) с коклековыми (*Atriplex cana*) по межсочным солонцеватым понижениям, иногда с тасбиюргуновыми (*Nanophyton erinaceum*) по межсочным эродированным понижениям (11).

**ИСКУССТВЕННЫЕ РАДИОНУКЛИДЫ В РАСТИТЕЛЬНОМ ПОКРОВЕ В МЕСТАХ ПРОВЕДЕНИЯ ИСПЫТАНИЙ
БОЕВЫХ РАДИОАКТИВНЫХ ВЕЩЕСТВ НА ПЛОЩАДКЕ «4»**

Таблица 1. Результаты полевой радиометрии и значения удельной активности искусственных радионуклидов ^{241}Am , ^{137}Cs , ^{90}Sr и $^{239+240}\text{Pu}$ в отобранных пробах почв и растений

Точка отбора	Результаты полевой радиометрии			Объект	Удельная активность радионуклидов, Бк/кг			
	β , част/(мин·см ²)	γ , мкЗв/ч			^{241}Am	^{137}Cs	^{90}Sr	$^{239+240}\text{Pu}$
		h=0 мсм	h=1 м					
1	<10	0,13	0,11	растения	<0,7	<0,15	120±3	6,8±0,3
				почва	<2,6	38±8	710±230	100±10
2	136	0,20	0,14	растения	<0,14	0,54±0,20	1250±10	0,26±0,04
				почва	4,1±0,8	36±7	3900±700	26,4±4,8
3	<10	0,12	0,10	растения	<0,2	<0,4	150±20	<0,04
				почва	2,0±0,4	32 ± 6	460±70	17±2
4	20	0,14	0,12	растения	<0,11	0,36±0,14	560±10	0,28±0,04
				почва	6,3±1,3	35±7	750±260	120±20
5	337	0,59	0,28	растения	<0,4	0,53±0,22	1700±10	1,02±0,08
				почва	<1,5	33±7	5600±900	24,1±4,9
6	70	0,20	0,16	растения	<0,25	<0,50	4700±200	0,38±0,07
				почва	8,0±1,6	30±6	10000±2000	60±10
7	<10	0,10	0,10	растения	<0,2	<0,3	18±3	<0,04
				почва	1,0±0,2	17±3	15±3	3,2±1,1
8	<10	0,18	0,14	растения	<0,12	0,38±0,18	35±2	0,28±0,03
				почва	<2,0	45±9	<100	11±4
9	<10	0,10	0,10	растения	<0,4	0,85±0,30	7,6±4,0	0,33±0,11
				почва	<2,7	32±6	<100	16±5
10	121	0,21	0,18	растения	<0,5	<0,6	6000±900	0,8±0,2
				почва	3,0±0,6	18±4	5800±900	120±7
11	<10	0,10	0,10	растения	<0,2	0,70±0,23	150±20	<0,04
				почва	5,0±1,0	15±3	26±4	45±5
12	13,3	0,12	0,11	растения	<0,4	<1,1	160±20	<0,04
				почва	10±2	17±3	350±50	21±3
13	157	0,33	0,18	растения	<0,6	<1,0	87±13	<0,03
				почва	6±1	14±3	17000±2000	26±3
14	<10	0,12	0,15	растения	<0,8	1,0±0,4	490±70	3,6±0,5
				почва	2,0±0,4	15±3	200±30	28±4
15	<10	0,12	0,12	растения	<0,1	<0,4	680±100	<0,01
				почва	<0,9	14±3	100±15	5,3±1,5
16	143	0,18	0,36	растения	<0,6	<1,7	18000±3000	<0,04
				почва	6±1	25±5	10000±2000	82±6

Измерения радиометрических параметров показали, что исследуемая территория площадки «4» имеет неравномерный характер загрязнения – плотность потока β -частиц на исследуемой территории варьирует от <0,10 до 337 част/(см²·мин), мощность эквивалентной дозы гамма-излучения на поверхности почвы изменяется в пределах от 0,10 до 0,59 мкЗв/ч, на высоте 1 м – от 0,10 до 0,28 мкЗв/ч (таблица 1).

В таблице 1 представлены результаты удельной активности искусственных радионуклидов ^{241}Am , ^{137}Cs , ^{90}Sr и $^{239+240}\text{Pu}$ в исследуемых образцах почвы и растений. По результатам проведенного лабораторного анализа установлено, что содержание ^{241}Am в почве исследованных участков варьирует от <2,7 до 10 Бк/кг, ^{137}Cs – от 14 до 45 Бк/кг. Более существенные вариации отмечаются для $^{239+240}\text{Pu}$ – от 3,2 до 120 Бк/кг. Максимальные значения содержания, как и ожидалось, зафиксированы для ^{90}Sr – от <100 Бк/кг до 17000 Бк/кг.

Удельная активность в растениях ^{137}Cs не превышает 1 Бк/кг, $^{239+240}\text{Pu}$ – 6,8 Бк/кг. Значения удельной активности ^{241}Am в растениях оказались ниже предела обнаружения используемого аппаратурно-методического обеспечения. Содержание ^{90}Sr варьирует от 7,6 до 18000 Бк/кг. Превышение предельно-допустимого уровня радиоактивного загрязнения кормовых растений [9] отсутствует для ^{137}Cs (74 Бк/кг), однако отмечается для ^{90}Sr (111 Бк/кг). Концентрация радионуклида $^{239+240}\text{Pu}$ в растениях не нормируется, однако, исходя из степени его общей радиотоксичности, можно предположить, что допустимый уровень будет ориентировочно на порядок меньше, чем по ^{90}Sr , что в целом выше полученных величин.

На основании полученных результатов проведена оценка максимально возможных дозовых нагрузок на наземную биоту (травянистое растение) для радиоактивно загрязненных участков в местах испытания БРВ на площадке «4». Суммарная мощность дозы облучения j -го референтного объекта D_j определя-

лась путем суммирования мощностей дозы внешнего и внутреннего облучения этого объекта $D_{i,j}$ от всех рассматриваемых радионуклидов i :

$$D_j = \sum_i D_{i,j}^{внутр} + D_{i,j}^{внеш}$$

Значения всех необходимых коэффициентов для расчета доз внутреннего и внешнего облучения растений заимствованы из литературных источников [10, 11]. Входными параметрами расчета являлись доминантные виды растений и максимальные значения удельной активности техногенных радионуклидов (^{137}Cs , ^{90}Sr , $^{239+240}\text{Pu}$ и ^{241}Am) в почве и растениях.

В таблице 2 представлены результаты расчета дозовых нагрузок от радионуклидов ^{137}Cs , ^{90}Sr , $^{239+240}\text{Pu}$ и ^{241}Am в растениях и в почве.

Таблица 2. Мощности дозы внутреннего и внешнего облучения растений

Радионуклид	Мощность дозы, мкГр/сут		
	внутренняя	внешняя	сумма
^{137}Cs	$2,9 \cdot 10^{-3}$	$1,2 \cdot 10^{-1}$	$1,2 \cdot 10^{-1}$
^{90}Sr	$2,2 \cdot 10^2$	$5,1 \cdot 10^{-5}$	56
$^{239+240}\text{Pu}$	$4,8 \cdot 10^{-1}$	$1,8 \cdot 10^{-4}$	$4,8 \cdot 10^{-1}$
^{241}Am	—	$7,9 \cdot 10^{-4}$	$7,9 \cdot 10^{-4}$
сумма	$2,2 \cdot 10^2$	$1,2 \cdot 10^{-1}$	$2,2 \cdot 10^2$

Максимальное значение суммарной мощности дозы для травянистой растительности от техногенных радионуклидов ^{137}Cs , ^{90}Sr , $^{239+240}\text{Pu}$ и ^{241}Am на территории радиоактивно загрязненных участков площадки «4» составило 220 мкГр/сут., при этом основной вклад вносит ^{90}Sr . Полученные результаты оценки мощности дозы находятся в диапазоне 10^{-4} – $5 \cdot 10^{-4}$ Гр/сут., что при хроническом облучении может приводить к небольшому увеличению цитогенетических эффектов [12].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По результатам проведенных исследований установлено, что территория площадки «4» в основном представлена экосистемами низких мелкосопочников, делювиально-пролювиальных равнин и экосистемами антропогеннопроизводными, реже встречаются экосистемы высоких мелкосопочников. Удельная активность в растениях ^{137}Cs не превышает 1 Бк/кг, $^{239+240}\text{Pu}$ – 6,8 Бк/кг, ^{241}Am – ниже предела обнаружения используемого аппаратно-методического обеспечения, содержание ^{90}Sr варьирует от 7,6 до 18000 Бк/кг. Превышение предельно-допустимого уровня радиоактивного загрязнения кормовых растений установлено лишь для ^{90}Sr , для которого отмечен и основной вклад в суммарную мощность дозы для травянистой растительности. При этом максимальное значение суммарной мощности дозы от всех исследуемых радионуклидов на радиоактивно загрязненных участках территории испытательной площадки «4» составляет 220 мкГр/сут.

Данные исследования выполнены в рамках программно-целевого финансирования BR21882086 «Разработка устойчивого управления земельными ресурсами и водными объектами на территории бывшего Семипалатинского испытательного полигона», а также РБП 036.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ядерные испытания в СССР: Цели. Общие характеристики. Организация ядерных испытаний СССР. Первые ядерные испытания / под. рук. В.Н. Михайлова; состав ред. И. А. Андрушин, В. В. Богдан, С. А. Зеленцев [и др.]. – Т. 1. – Саров: РФЯЦ – ВНИИЭФ, 1997. – 286 с.
2. Осинцев, А.Ю. Исследование характера и уровней радиоактивного загрязнения площадки испытаний боевых радиоактивных веществ / А. Ю. Осинцев, С. Е. Сальменбаев // Актуальные вопросы радиоэкологии Казахстана [Сборник трудов Национального ядерного центра Республики Казахстан за 2011–2012]. – Павлодар: Дом печати, 2013. – Т. 1. – Вып. 4. – С. 189–201. – ISBN 978-601-7112-74-5.
3. Скрипников М.В. Площадное радиационное обследование мест проведения испытаний боевых радиоактивных веществ на испытательной площадке «4» Семипалатинского испытательного полигона / М.В. Скрипников, А.О. Айдарханов, М.А. Умаров [и др.] // Вестник НЯЦ РК. – Курчатова, 2020. – Вып. 1 (81). – С. 82–86.
4. Ларионова, Н.В. Параметры накопления радионуклидов растениями в местах испытания боевых радиоактивных веществ на территории бывшего Семипалатинского испытательного полигона/ Н.В. Ларионова, С.Н. Лукашенко, Н.И. Санжарова // Радиация и риск. – 2013. – Т. 22, № 4 – С. 85–65. – Библиогр.: с. 65.
5. Полевая геоботаника: в 5 т. / АН СССР. Ботан. ин-т им. В. Л. Комарова; под общ. ред. Е.М. Лавренко, А.А. Корчагина. – М., Ленинград: Наука, 1959–1976. (Т. 1, 1959. – 444 с.; Т. 2, 1960. – 500 с.; Т. 3, 1964. – 530 с.; Т. 4, 1972. – 336 с.; Т. 5, 1976. – 320 с.).
6. Инструкция и методические указания по наземному обследованию радиационной обстановки на загрязненной территории: утв. Межведомственной комиссией по радиационному контролю природной среды при Госкомгидромете СССР. – М., 1989.
7. Активность радионуклидов в объемных образцах. Методика выполнения измерений на гамма-спектрометре: МИ 2143-91. – Введ. 1998-06-02. – Рег. № 5.06.001.98. – М.: НПО ВНИИФТРИ, 1991. – 17 с.
8. Методика определения содержания искусственных радионуклидов плутония-(239+240), стронция-90 в объектах окружающей среды (почвах, грунтах, донных отложениях и растениях). – Алматы: РГП ИЯФ МЭ РК, 2021. – 26 с.
9. Временные допустимые уровни содержания радионуклидов в объектах контроля Минсельхоза РК, не вошедших в перечень Минздрава Республики, 22.02.94.
10. Методические рекомендации Р52.18.820-2015. Оценка радиационно-экологического воздействия на объекты природной среды по данным мониторинга радиационной обстановки. Обнинск, 2015. – 60 с.

11. Практические рекомендации по вопросам оценки радиационного воздействия на человека и биоту. Под общей редакцией И.И. Линге и И.И. Крышева. – Москва, 2015 г. – 265 с.
 12. ICRP, 2008. Environmental Protection - the Concept and Use of Reference Animals and Plants. ICRP Publication 108. Ann. ICRP 38 (4–6).
- REFERENCES**
1. Yadernye ispytaniya v SSSR: Tseli. Obshchie kharakteristiki. Organizatsiya yadernykh ispytaniy SSSR. Pervye yadernye ispytaniya / pod. ruk. V.N. Mikhaylova; sostav red. I. A. Andryushin, V. V. Bogdan, S. A. Zelentsev [i dr.]. – Vol. 1. – Sarov: RFYaTs – VNIIEF, 1997. – 286 p.
 2. Osintsev, A.Yu. Issledovanie kharaktera i urovney radioaktivnogo zagryazneniya ploshchadki ispytaniy boevykh radioaktivnykh veshchestv / A. Yu. Osintsev, S. E. Sal'menbaev // Aktual'nye voprosy radioekologii Kazakhstan [Sbornik trudov Natsional'nogo yadernogo tsentra Respubliki Kazakhstan za 2011–2012]. – Pavlodar: Dom pečhati, 2013. – Vol. 1. – Issue 4. – P. 189–201. – ISBN 978-601-7112-74-5.
 3. Skripnikov M.V. Ploshchadnoe radiatsionnoe obsledovanie mest provedeniya ispytaniy boevykh radioaktivnykh veshchestv na ispytatel'noy ploshchadke «4» Semipalatinskogo ispytatel'nogo poligona / M.V. Skripnikov, A.O. Aydarkhanov, M.A. Umarov [i dr.] // Vestnik NYaTs RK. – Kurchatov, 2020. – Issue 1 (81). – P. 82–86.
 4. Larionova, N.V. Parametry nakopleniya radionuklidov rasteniyami v mestakh ispytaniya boevykh radioaktivnykh veshchestv na territorii byvshego Semipalatinskogo ispytatel'nogo poligona/ N.V. Larionova, S.N. Lukashenko, N.I. Sanzharova // Radiatsiya i risk. – 2013. – Vol.22, Issue 4 – P. 85–65. – Bibliogr.: p. 65.
 5. Poleyvaya geobotanika: vol. 1–5. / AN SSSR. Botan. in-t im. V. L. Komarova; pod obshch. red. E.M. Lavrenko, A.A. Korchagina. – Moscow., Leningrad: Nauka, 1959–1976. (Vol. 1, 1959. – 444 p.; Vol. 2, 1960. – 500 p.; Vol. 3, 1964. – 530 p.; Vol. 4, 1972. – 336 p.; Vol. 5, 1976. – 320 p.).
 6. Instruksiya i metodicheskie ukazaniya po nazemnomu obsledovaniyu radiatsionnoy obstanovki na zagryaznennoy territorii: utv. Mezhvedomstvennoy komissiiy po radiatsionnomu kontrolyu prirodnoy sredy pri Goskomgidromete SSSR. – Moscow, 1989.
 7. Aktivnost' radionuklidov v ob'emnykh obraztsakh. Metodika vypolneniya izmereniy na gamma-spektrometre: MI 2143-91. – Vved. 1998-06-02. – Reg. No. 5.06.001.98. – Moscow: NPO VNIIFTRI, 1991. – 17 p.
 8. Metodika opredeleniya soderzhaniya iskusstvennykh radionuklidov plutoniya-(239+240), strontsiya-90 v ob"ektakh okruzhayushchey sredy (pochvakh, gruntakh, donnykh otlozheniyakh i rasteniyakh)». – Almaty: RGP IYaF ME RK, 2021. – 26 p.
 9. Vremennye dopustimye urovni soderzhaniya radionuklidov v ob"ektakh kontrolya Minsel'khoza RK, ne voshedshikh v perechen' Minzdrava Respubliki, 22.02.94.
 10. Metodicheskie rekomendatsii R52.18.820-2015. Otsenka radiatsionno-ekologicheskogo vozdeystviya na ob"ekty prirodnoy sredy po dannym monitoringa radiatsionnoy obstanovki. Obninsk, 2015. – 60 p.
 11. Prakticheskie rekomendatsii po voprosam otsenki radiatsionnogo vozdeystviya na cheloveka i biotu. Pod obshchey redaktsiyei I.I. Linge i I.I. Krysheva. – Moscow, 2015 g. – 265 p.
 12. ICRP, 2008. Environmental Protection - the Concept and Use of Reference Animals and Plants. ICRP Publication 108. Ann. ICRP 38 (4–6).

«4» АЛАҢЫНДА ӘСКЕРИ РАДИОАКТИВТІ ЗАТТЕКТЕР СЫНАЛҒАН ЖЕРЛЕРДЕГІ ӨСІМДІК ЖАМЫЛҒЫСЫНДАҒЫ ЖАСАНДЫ РАДИОНУКЛИДТЕР

Н. В. Ларионова*, А. В. Топорова, П. Е. Кривицкий, В. В. Полевик, А. Е. Кундузбаева, А. О. Айдарханов

ҚР ҰЯО РМК «Радиациялық қауіпсіздік және экология институты» филиалы, Қурчатов, Қазақстан

* Байланыс үшін E-mail: larionova@nnc.kz

Мақалада ^{241}Am , ^{137}Cs , ^{90}Sr , $^{239+240}\text{Pu}$ жасанды радионуклидтердің өсімдік жамылғысындағы әскери радиоактивті заттектерді (ӘРЗ) сынау орындарындағы «4» алаңындағы құрамы туралы мәліметтер келтірілген. Жемшөп өсімдіктерінің радиоактивті ластануының шекті рұқсат етілген деңгейінің артуы ^{90}Sr бойынша байқалады, оның құрамы 7,6-дан 18000 Бк/кг-ға дейін құбылады. Зерттелетін радионуклидтерден шөптесін өсімдіктер үшін дозаның жалпы қуатының максималды мәні 220 мкГр/тәул құрайды, ал ^{90}Sr радионуклиді негізгі үлесін қосады.

Түйін сөздер: Семей сынақ полигоны (ССП), әскери радиоактивті заттектер (ӘРЗ), жасанды радионуклидтер, өсімдік жамылғысы, үлестік белсенділік.

ARTIFICIAL RADIONUCLIDES IN THE PLANT COVER OF TEST LOCATIONS OF RADIOLOGICAL
WARFARE AGENTS AT THE '4' SITE

N. V. Larionova^{*}, A. V. Toporova, P. Ye. Krivitskiy, V. V. Polevik, A. Ye. Kunduzbayeva, A. O. Aidarkhanov

Branch "Institute of Radiation Safety and Ecology" RSE NNC RK, Kurchatov, Kazakhstan

** E-mail for contacts: larionova@nnc.kz*

The article presents data on the content of artificial radionuclides ^{241}Am , ^{137}Cs , ^{90}Sr and $^{239+240}\text{Pu}$ in the plant cover of the '4' site at test locations of radiological warfare agents (RWA). The excess of the maximum permissible level of radioactive contamination in forage plants is recorded for ^{90}Sr , the content of which varies from 7.6 to 18000 Bq/kg. The maximum value of overall dose rate for the herbaceous vegetation from radionuclides of interest is 220 $\mu\text{Gy/day}$, with ^{90}Sr making the main contribution.

Keywords: *Semipalatinsk Test Site (STS), radiological warfare agents (RWA), artificial radionuclides, vegetation cover, specific activity.*

<https://doi.org/10.52676/1729-7885-2025-1-12-20>
УДК 53.083

TECHNICAL STUDY OF ENGINEERING COMMUNICATIONS BY ULTRASONIC DEFECTOSCOPY

G. N. Sembaeva, I. E. Aldabergen*

Abylkas Saginov Karaganda Technical University, Karaganda, Kazakhstan

** E-mail for contacts: inkar94_kz@mail.ru*

The article discusses whether special attention should be paid to long-wave ultrasonic radiating systems used to detect corrosion and other defects on internal and external surfaces. This allows you to monitor the presence of corrosion and other defects in long pipes in hard-to-reach places.

Currently, relevant state industry standards are being developed that are used in the design and calculations of process pipelines, but for now it is better for expert institutions to pay special attention to diagnosing the technical condition. To do this, it will be necessary to use the most precise diagnostic solutions and provide a prognosis based on the entire system.

Keywords: *remote methods, electromagnetic radiation, ultraviolet, pipelines, ultrasound, flaw detection, radiation monitoring, acoustic research.*

INTRODUCTION

The study of the technical condition of engineering systems is carried out during a comprehensive study of the technical condition of buildings and structures. The study of engineering systems and their elements is carried out to determine the actual technical condition of the systems, identify defects, damage and malfunctions, quantify physical and moral wear and tear, and establish deviations from the design.

The assessment of the technical study of engineering systems of buildings and structures is carried out taking into account the service life of elements and the average standard life of certain engineering devices.

The physical wear of the system is determined as the weighted average sum of wear of elements [11].

Ultrasonic defectoscopy is a method proposed by S. Y. Sokolov in 1928 and based on the study of the propagation of ultrasonic vibrations with a frequency of 0.5–25 MHz in controlled products with the help of special equipment – ultrasonic flaw detector. It is one of the most widespread methods of nondestructive testing.

The diagnostic device market currently offers new effective methods for diagnosing process pipelines. One of the dynamically developing areas in the field of industrial safety is the construction and modernization of life-saving equipment, assessment of the current state of equipment at hazardous production facilities. Therefore, to determine the technical condition of process pipelines, it is necessary to consider the possibility of supporting modern and effective diagnostic methods in conditions of high responsibility of expert institutions [1].

The market of diagnostic devices currently offers new effective methods for diagnostics of process pipelines. One of the dynamically developing areas in the field of industrial safety is the construction and modernization of life-saving equipment, assessment of the current state of equipment at hazardous production facilities. Therefore, to determine the technical condition of process pipelines,

it is necessary to consider the possibility of supporting modern and effective diagnostic methods in conditions of high responsibility of expert institutions [2].

1. PRINCIPLE OF WORK

Sound waves do not change their trajectory in a homogeneous material. The reflection of acoustic waves occurs at the interface of media with different specific acoustic impedances. The more the acoustic impedances differ, the greater the fraction of sound waves reflected from the interface. Since inclusions in metal usually contain gas (mixture of gases) arising due to welding, casting, etc. The mixture of gases has five orders of magnitude lower specific acoustic impedance than the metal itself, so the reflection will be almost complete [5].

The resolving power of acoustic examination, i.e. the ability to detect small defects separately from each other, is determined by the sound wavelength, which in turn depends on the frequency of input of acoustic vibrations. The higher the frequency, the smaller the wavelength. The effect arises from the fact that when the size of the obstacle is less than a quarter of the wavelength, the reflection of the oscillations practically does not occur, and their diffraction dominates. Therefore, as a rule, the frequency of ultrasound tends to increase. On the other hand, when increasing the frequency of oscillations quickly increases their attenuation, which reduces the possible area of control. The practical compromise was frequencies in the range from 0.5 to 10 MHz.

Advantages

Ultrasonic inspection does not destroy or damage the sample under test, which is its main advantage. It is possible to control products from a variety of materials, both metals and nonmetals. In addition, we can emphasize the high speed of research at low cost and danger to humans (compared to X-ray flaw detection) and high mobility of ultrasonic flaw detector.

Disadvantages

The use of piezoelectric transducers requires surface preparation for ultrasound input into the metal, in particular the creation of surface roughness of at least class 5, in the case of welded joints and the direction of roughness (perpendicular to the weld). Due to the high acoustic resistance of air, the smallest air gap can become an insurmountable barrier to ultrasonic vibrations. In order to eliminate the air gap, contact liquids such as water, oil, or glue are preapplied to the area to be inspected. When inspecting vertical or highly inclined surfaces, thick contact liquids should be used to prevent rapid dripping [3].

To control products with an outer diameter less than 200 mm, it is necessary to use transducers with the radius of curvature of the sole – equal to 0.9–1.1 R radius of the controlled object, the so-called lapped transducers, which in this form are unsuitable for control of products with flat surfaces. For example, to control a cylindrical forging, it is necessary to move the transducer in two mutually perpendicular directions, which implies the use of two lapped transducers - one for each direction.

As a rule, ultrasonic flaw detection cannot answer the question about the actual size of the defect, only about its reflectivity in the direction of the receiver [5]. These values are correlated, but not for all types of defects. In addition, some defects are practically impossible to detect by ultrasonic method due to their nature, shape or location in the object of inspection.

It is practically impossible to perform reliable ultrasonic inspection of metals with coarse-grained structure, such as cast iron or austenitic welds (thickness over 60 mm) because of the large scattering and strong attenuation of ultrasound. In addition, it is difficult to inspect small parts or parts with complex shapes. It is also difficult to ultrasonic inspection of welded joints made of dissimilar steels (for example, austenitic steels with pearlitic steels) due to the extreme heterogeneity of the weld metal and base metal.

Electromagnetic radiation can detect, compare, and analyze spectral characteristics in various ranges, as well as obtain information about objects, including their size, density, chemical composition, physical structure, and current state [7]. The g-band is used to search for radioactive ores and sources, and the ultraviolet part of the spectrum is used to determine the chemical composition; the light range is most informative when studying soils and vegetation cover.

Possible applications of this system:

- intersection of pipelines with roads and railways;
- section of pipe passing through the wall;
- 100% control volume straight sections of pipelines if necessary;
- ground sections of the pipeline;
- monitoring for corrosion under the insulation (with minimal insulation removal);
- cryogenic pipeline.

Obvious advantages of the system:

- ability to monitor pipelines without decommissioning them;
- the pipe is checked 100%;
- insulation cleaning is not required (only at the ring installation site);
- ability to work with dry contact and paintwork;
- you do not need to apply any effort to the pipeline, as when observing with acoustic emission systems.

The system is certified and included in the state register of measuring instruments.

The ultrasonic method of non-destructive testing (NDT) is one of the most cumbersome and difficult to understand in the learning process. Therefore, not every specialist can master a full course on this control method [7].

If a specialist has a secondary or higher technical education, for example, performs functions such as $\sin\alpha$, $\cos\alpha$, $\tan\alpha$, etc., then it is correct to be able to perform calculations on a calculator. The main thing is to be able to handle complex work that takes a lot of time. The traditional ultrasound method is one of the most common NDT methods in the search for internal defects. Acoustic NC methods, installations and devices that use ultrasonic frequency ranges can be called ultrasonic according to GOST 23829, for example, “ultrasonic flaw detection”, “ultrasonic flaw detector”. Ultrasonic flaw detection-violation of integrity and uniformity [9]. The principle of conducting ultrasonic echo-pulse observations is based on sending ultrasonic pulses to the irradiating product. When encountering an obstacle, such as a defect or a reverse surface, some of the energy of the ultrasonic wave is emitted and returned to the emitter. The ultrasonic vibration receiver converts ultrasonic vibrations passing through the product into electrical ones that go to the screen – the main indicator of the flaw detector. The electronic unit of the flaw detector is measured by the following calculation of the pulse travel time to the radiation reflection object and the distance according to the formula: $S=(t \cdot c)/2$, where S is the distance to the radiation object, c is the speed of ultrasound propagation in the product material, and t is the time of ultrasound travel to the radiation object and back.

Characteristic defects in welded joints, melting, packaging, as well as in suspensions of railway transport. No melting at the bottom of the welds. Do not melt the aisles. Explosions. Rupture of the disc on the Locomotive wheel in the area of the hub. Fragments of screws along the 1st and 4th turns. Layering of the base metal. Internal defects on the UT RT side frame [8].

It is believed that the twin of ultrasonic NC is radiation control (RC). However, traditional ultrasound monitoring cannot completely replace radiation monitoring or vice versa. A spherical slit-type defect “sees” ultrasound as a point, and the amplitude of the reflected signal on the flaw detector screen is within the transmission range, that is, it can be effective. When performing radiation monitoring, the same defect looks like a plane and may be

inefficient in size. At this point, a vertical explosion that coincides with the direction of radioactive radiation may occur due to insufficient distribution of the intensity of the transmitted rays. When conducting ultrasound control by the "Tandem" method, vertical breaks are perfectly detected. One of the transducers is the emitter, and the other is the receiver, or vice versa. The main advantage of the radiation method of observation over ultrasound is that the obtained images analyze the defect image with the possibility of storing and re-analyzing them. When carrying out radiation monitoring, it is necessary to strictly observe the safety rules approved by regulatory documents in order to avoid dangerous exposure of employees served by harmful gases generated under the influence of ionizing radiation and radiation in the air. Currently, there are innovative technologies in combination with the use of ultrasound instead of radiation monitoring. Conducting testing of phased array technology using ultrasonic testing using innovative technologies (PAUT): a) automated monitoring with an Omniscan MX + TOFD flaw detector, b) manual monitoring with a Phasor XS flaw detector, c) manual monitoring with a VEO flaw detector. For these purposes, the ultrasonic diffraction – time observation method (TOFD) is used, as well as the ultrasonic method using phased array transducers (PAUT). There is an ASME 2235-9:2005 "Use of Ultrasonic Examination in Lieu of Radiography Section I; Section VIII, Divisions 1 and 2; and Section XII" standard for the use of ultrasound inspection instead of radiation inspection. Based on ultrasound observations, diffraction analysis is used here. A time-based method using a complex with a phased array ultrasonic transducer (PAUT), as well as traditional ultrasound observation, including observation of layers of large thickness. When applying the ultrasonic method using the diffraction-time control method and converters in the form of phased arrays, mandatory documentation of the control results with its high-level execution is carried out, in contrast to traditional manual ultrasonic control, where the performance of the control results is not particularly high. Information about the control performed can be stored by the customer and the contractor. The analysis of the observation results can be reviewed by another specialist [10].

Advantages of the system

The defect control system has a number of advantages that make this method more effective than others, using ultrasonic waves:

- prompt identification of damaged areas;
- It can be used in hard-to-reach places;
- ability to work on a free pipeline;
- the ability to detect breaks and control the thickness of the material;
- usability and system integrity;
- ability to quickly diagnose long pipes;
- effective balance of speed and quality of research;
- highly informative research.

Using this monitoring system saves time spent on studying the quality of the pipeline by additional methods that do not give such fast and accurate results.

Limitations of the ultrasonic flaw detector

Despite the obvious advantages, the system has some limitations. This method allows you to study long pipes (up to 100 meters), but the greatest efficiency is observed only when the pipe length does not exceed 50 meters.

This system quickly detects defects, but does not allow you to determine the size and depth of the violation.

Ultrasonic flaw detection is a method proposed by S. Y. Sokolov in 1928 and based on the study of the propagation of ultrasonic vibrations at a frequency of 0.5–25 MHz in controlled products using a special device—an ultrasonic flaw detector. It is one of the most common methods of non-destructive testing.

Operating principle

Sound waves do not measure the trajectories of a material of the same origin. The image of acoustic waves comes from a section of media with various inherent acoustic disturbances. As the acoustic barriers become more separated, most of the additional waves are reflected from the boundaries of the middle sections. Since compounds in metal often form a gas (a mixture of gases) formed during welding, melting, etc., the metal does not have time to come out during solidification, if the mixture of gases has five rows less of its own acoustic resistance than the metal itself, then the video will be complete.

The allowable ability of acoustic research, i.e. the ability to detect small defects separately from each other, is determined by the length of sound velocity, which, in turn, depends on the input speed of acoustic vibrations. The higher the frequency, the lower the wavelength. The effect occurs at Dam sizes smaller than a quarter of a wavelength, there was no image of oscillations, their diffraction would prevail. On the other hand, when the rate of oscillation increases, their attenuation increases rapidly, which shortens the possible area of Control [9].

Advantages

Ultrasonic testing does not spoil the studied option, which is its main advantage. Control over the product can be carried out from various materials, both metallic and non-metallic. Then a high rate of research with a low price and risk for the person will be determined.

Disadvantages

The use of piezoelectric transducers requires preparation for introducing ultrasound into a flat metal. Due to the large acoustic resistance of the air, a small air hole can be an obstacle to ultrasonic vibrations. To get rid of the air gap, contact fluids such as water, oil, and paste are introduced into the controlled area of the product. When observing vertical or highly inclined surfaces, thick contact fluids must be used to prevent rapid leakage [14].

To control products with an external diameter of less than 200 mm, it is necessary to use converters with a radius of curvature R equal to the radius of the controlled object $0.9-1.1 R$, for the control of flat products, these modified converters are not suitable. this type. For

example, to control a cylindrical winding, the converter must be moved in two mutually perpendicular directions, which leads to the use of two sealed converters, one for each direction.

As a rule, ultrasonic flaw detection cannot answer the question about the actual size of the defect, only about its reflectivity in the direction of the receiver. These values are correlated, but not for all types of defects. In addition, some defects are almost impossible to detect by ultrasound due to their nature, shape or location in the object of control [11].

2. ULTRASONIC TESTING

Ultrasonic testing (UT) of nondestructive testing (NDT) is one of the most voluminous and difficult to master in the training process. Therefore, not every specialist can master the course on this method of control in full volume with the condition to successfully pass the comprehensive examination in accordance with STB EN 473:2011 or EN ISO 9712:2012. In order to master the course on ultrasonic method of NDT, the specialist must have a concept of ultrasonic control (some practical skills), technical mindset. It is good when the specialist has a secondary or higher technical education, can perform calculations on a calculator, such as functions $\sin\alpha$, $\cos\alpha$, $\tan\alpha$ and others. And the main thing is the willingness to endure a long and complex course of study without missing any classes. The aim of the course is to obtain new and deepen the existing knowledge on ultrasonic method of control, to obtain and improve practical skills of work with ultrasonic flaw detectors such as UD2-70, UD2-102, UD3-103, UD4-T, UD4-76, USM-35, USM-GO, SITESCAN 250, EPOCH 1000 Panametrics and other modern flaw detectors. The number of hours for conducting training, which includes obtaining both theoretical knowledge and practical skills:

- Level 1 – 80 hours;
- Level 2 – 80 hours (direct training for Level 2 – 160 hours) [10].

The training period is 20 days (4 weeks). The form of training is on-the-job.

Mode of training – 8–10 hours per day. Traditional ultrasonic method in the search for internal defects is one of the most common methods of NDT.

Methods, instruments and devices of acoustic NDT, using ultrasonic frequency range, according to state standard 23829 may be called ultrasonic, for example, “ultrasonic flaw detection”, “ultrasonic flaw detector”. Ultrasonic defectoscopy is the conduct of ultrasonic inspection for defects such as violation of the continuity or homogeneity of the material of the product. The principle of inspection with the ultrasonic echo – pulse method is based on the fact that the transmitter sends ultrasonic pulses into the product. When encountering an obstacle, such as a defect or back (bottom) surface, part of the

ultrasonic wave energy is reflected and returned back to the transmitter. The ultrasonic receiver converts the ultrasonic vibrations passed through the product into electrical vibrations, which are fed to the screen – the main indicator of the flaw detector. The electronic unit of the flaw detector measures the time of pulse passage to the object of reflection and back with the subsequent conversion into distance by the formula: $S = (t \cdot c) / 2$, where S is the distance to the object of reflection; c is the velocity of ultrasound propagation in the material of the product; t is the time passed by the ultrasonic wave to the object of reflection and back. Characteristic defects in welded joints, castings, forgings, as well as railway transport parts. However, conventional ultrasonic inspection cannot completely replace radiation inspection and vice versa. Thus, a spherical defect such as a pore ultrasound “will see” as a point, and the amplitude of the reflected signal on the flaw detector screen may be within tolerance, i.e. acceptable. When conducting radiation control, the same defect will be seen as a plane and may not be acceptable in size. At the same time, a vertical crack coinciding with the direction of radioactive radiation may be missed due to insufficient intensity distribution of the passing rays. Vertical cracks are very well detected in tandem ultrasonic inspection. One of the transducers is a radiator and the other is a receiver or vice versa. The main advantage of radiation method of control over ultrasound is that the images of defects are analyzed on the obtained images with the subsequent possibility of their storage and re-analysis. A significant disadvantage of radiation methods is that when conducting radiation control in order to avoid dangerous exposure of the operating personnel to ionizing radiation and harmful gases formed in the air under the influence of radiation, it is necessary to strictly follow safety rules established by regulatory documents. Nowadays there are innovative technologies using ultrasound instead of radiation control. For these purposes is used ultrasonic diffraction-time method of control (TOFD), as well as ultrasonic method using transducers in the form of phased arrays (PAUT). There is a standard ASME 2235-9:2005 “Use of Ultrasonic Examination in Lieu of Radiography Section I; Section VIII, Divisions 1 and 2; and Section XII” on the use of ultrasonic inspection in lieu of radiation inspection. The term ultrasonic inspection here refers to the integrated use of time-of-flight diffraction (TOFD) in conjunction with phased array ultrasonic transducers (PAUTs), as well as conventional ultrasonic inspection itself, including inspection over thick layers [12].

Sophisticated software tools allow for classification of reflections from changes in the pipe cross-section. Therefore, the system provides 100% coverage of the pipe section up to 100 m in length from the location of the sensor rings in each direction (Figure 1).

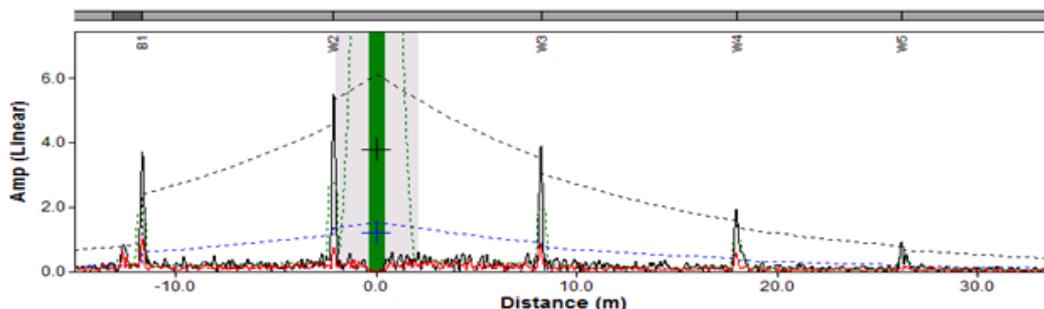


Figure 1. Classification of reflection from changes in the cross-section of the pipe

The defect inspection system through ultrasonic waves has a number of advantages that make this method more effective than others:

- prompt detection of damaged areas;
- possibility of use in hard-to-reach places;
- possibility to work on an empty (unfilled) pipeline;
- possibility of crack detection and material density control;
- ease of use and mobility of the system;
- possibility of operative diagnostics of a pipe having a long length;
- optimum balance of speed and quality of examination;
- high informativeness of the examination.

The use of this control system significantly saves the time required to investigate the pipeline quality using additional methods that do not provide such fast and accurate results.

Limitations of the ultrasonic flaw detector

Despite the obvious advantages, the system still has some limitations. This method allows the examination of pipes with a long length (up to 100 meters), but the greatest efficiency is observed when the length of the pipeline does not exceed fifty meters.

This system quickly identifies defects, but does not accurately determine the size and depth of the damage.

Briefly on the features of the method itself.

Nowadays, a significant number of pipelines of various technological purposes after long-term operation require condition assessment in order to ensure reliability, resource extension and optimization of repair, installation and construction works [13].

Traditionally, this issue has been solved mainly by using in-line diagnostics (ILD) as the most effective method of diagnostics. And it is justified. However, this method is not applicable in all cases, namely, for CTD a necessary condition is the construction of launching and receiving units, which is not always possible for one reason or another, this method is not applicable in case pipes and crane units of different diameters were used on the pipeline. And it is in these cases that the non-contact magnetometric method of diagnostics is the most effective.

Advantages of the magnetometric method of diagnostics:

- There is no need for preliminary preparation of the pipeline for inspection (cleaning, running of calibrator shells) and no change of operating modes of product transportation, i.e. there is no need to stop the pipeline operation, which significantly reduces the cost of diagnostics;
- No magnetization of the object metal is required;
- Various types of defects are detected (including longitudinal crack-like defects, defects of welded assembly joints);
- No restrictions on the diameters of surveyed pipelines (any cross-section) and their design features (angles of bends, elevations, pipe wall thickness, operating pressure in the pipeline, etc.);
- Allows to organize monitoring and fill in the database on passportization of objects, because it is carried out at any distance and with unlimited minimum periodicity;
- Accurately positions underground pipelines on the route, as it allows multiple refinements of the location of anomalies on the site, in particular, water crossings;
- It is used for objects where in-line flaw detection is not possible (equipped with start-receive chambers, markers, with unremoved lining rings, welding grit, etc.);
- Provides a significant reduction in the full cycle time of the work;
- Guarantees minimal involvement of the Customer's resources for preparatory works.

It should be noted that in order to obtain the true technical condition of gas and oil pipelines it is necessary to carry out a comprehensive survey consisting of:

- Analysis of design, executive and operational documentation, nature and scope of repairs performed during the operation period, results of technical inspections.
- Route analysis. Positioning of the pipeline location in the global coordinate system by GPS satellite navigation system. Pipeline condition diagnostics by non-contact magnetometric method. Pipeline condition diagnostics by non-contact electromagnetic method. Diagnostics of the pipeline insulation coating by corrosion monitoring device; Data processing based on the results of

inspections, preliminary assessment of the technical condition of the pipeline with identification of anomalous sections;

- Determination of anomalous pipeline sections for control pits;

- Defectoscopic inspection of the pipeline by traditional methods in control pits: visual and measuring inspection; instrumental control of adhesion and thickness of insulation coating; control by magnetic metal memory method; ultrasonic thickness measurement; radiographic inspection of welded joints; ultrasonic inspection of welded joints and base metal; capillary inspection; hardness measurements; metallographic examination of pipe metal and welded joints;

- Technical diagnostics of pipelines by acoustic emission method in sections where it is impossible to inspect by contact methods of control at crossings, water obstacles, etc.);

- Processing and analysis of technical diagnostics results, registration of inspection results.

- Assessment of residual life, development of recommendations on bringing the object in compliance with the requirements of regulatory and technical documentation [14].

This method allows for diagnostics without taking the facility out of operation for a short time or taking it out of service, which provides clear economic advantages over other methods of OB, which require stopping the facility for general inspection. Figure 2 shows the results of monitoring the condition of the insulation of various existing pipelines.

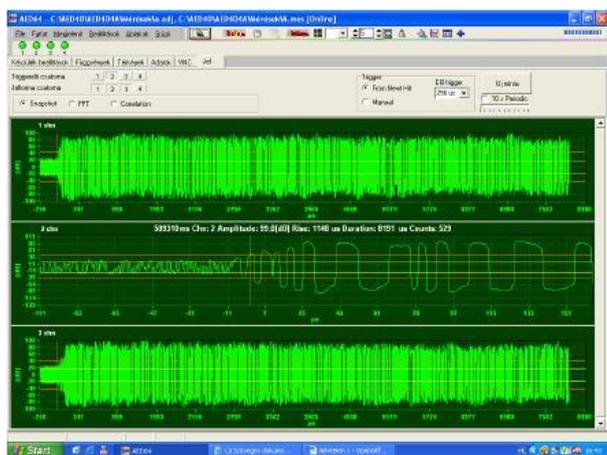


Figure 2. Results of monitoring the condition of insulation of pipelines in various uses

As can be seen from the above, the magnetometric method, despite the fact that earlier minor works in this direction have already been carried out, is a novelty in terms of wide application in the field of diagnostics of gas and oil pipelines in the territory of the Republic of Kazakhstan. Our company is actively working on the issue of popularization of this method. It should be noted that this method has wide possibilities in terms of improvement and modernization of both applied diagnostics

devices and expansion of the number of obtained parameters, which can be a good topic of research and development work (R&D). It should be noted that the result of R&D on non-contact diagnostics could have a real application in the oil and gas sector.

The purpose of the method is detection, determination of coordinates and monitoring of magnetic field anomalies associated with defects of base metal, welded joint metal, as well as the general stress state of the gas pipeline.

The method provides detection and registration of defective sections of pipelines, and allows to classify incipient and developing defects by the degree of danger.

1. The hazard assessment of the detected defects is performed by the integral index F , which takes into account the extent of magnetic anomaly S in m, amplitudes and shape of distribution of the magnetic field intensity vector.

F reflects the amount of excess of the recorded values of the magnetic field over the background values, the density of typical values and the nature of their distribution are calculated by the formula:

$$F = (F + 1) e - K \cdot A / S. \quad (1)$$

K – degree of stress concentration in the stress concentration zone, in turn calculated by the formula:

$$K = \sqrt{\cos 2\alpha + \cos 2\beta + \cos 2\gamma} \quad (2)$$

Where $\cos \alpha$, $\cos \beta$, $\cos \gamma$ – directing cosines of the vector of stress concentration, i.e. in the determination of the technical condition of the pipe are included quite a lot of approximate calculation data and coefficients, which does not allow to count on high accuracy of measurement results, and accordingly, the results of making adequate decisions.

2. The criterion for assessing the technical condition of the pipeline is again reduced to three states:

- Good – $0.75 \div 1.0$;
- Acceptable – $0.45 \div 0.75$;
- Unacceptable – 0.45 .

Which approximately corresponds to the methodology according to the results of WTD (“Pre-critical”, “Critical”, “Zacritical”).

3. The assessment of the pipeline is omitted not only by condition, but also by actual operation mode, since for the last 8–10 years the pipeline has been operating in the mode of 50–60% of loading from RPr , this indicator is not taken into account [4].

3. TASKS OF HYDRAULIC CALCULATION OF NETWORKS

The final purpose of water supply network calculation is to determine the diameters of network lines and head losses in them. In case diameters, characteristics of pumping stations, regulating tanks, etc. are known, the calculation results in determination of true flow rates in the network lines, actual water supply by all water suppliers and pressures created by them, as well as pressures in all network nodes and non-fixed withdrawals.

The configuration, section lengths and nodal water withdrawals must always be specified for the water distribution network to be calculated, the hydraulic calculation of water distribution networks is based on the assumption that the distribution of water along the network lines takes place in accordance with Kirchhoff's laws. Thus, in accordance with Kirchhoff's I law in each node should be observed material balance, which corresponds to the principle of continuity of flow. According to the conditions of water supply network operation, it means that the algebraic sum of flow rates in any node of the network is equal to zero:

$$\sum q_{ik} - Q_i = 0 \quad (3)$$

According to Kirchhoff's II law, the condition of total zero change of pressure drop (potential difference) in any circuit of the system is required. For a ring network, this means that the algebraic sum of head losses in any circuit of the i -th network is zero:

$(\sum S_{ik} q_{ik}^{\beta})_i = 0$, where q_{ik} – flow rate along the sections of the water supply network, m^3/s ; Q_i – nodal withdrawals, Q_i/s ; S_{ik} – hydraulic resistance of the line.

If there are pressure-flow characteristics of water feeders $F(Q)_M$ and non-fixed outlets $F(Q)_K$ located at the nodes of the system M and K , then in addition to the last equation the equations of the following form are used $F(Q)_M - F(Q)_K = (\sum S_{ik} q_{ik}^{\beta})_{MK}$.

The interaction between water feeders and non-fixed outlets is realized through head losses $(\sum S_{ik} q_{ik}^{\beta})_{MK}$ in the network lines connecting them. The flow distribution in a ring network, under which the above laws are observed, corresponds to the minimum of energy consumed to overcome head losses in pipes [9].

Before establishing the number of equations of Kirchhoff's I and II laws characterizing the flow distribution in the system, let us consider the properties of the water supply network. Considering the geometrical properties of a ring network, we can establish a certain relationship between the number of its elements, i.e. the number of rings, nodes and sections. By denoting the number of rings by n , the number of nodes by m , the number of sections by p and the number of water suppliers and non-fixed withdrawals by e , the following relationship can be established:

$$p = m + n + e - 1 \quad (4)$$

This provision is a consequence of Euler's theorem on the relationship between the number of faces, vertices and edges of a convex polyhedron. It allows us to establish the relationship between the number of levels of Kirchhoff's I and II laws in the calculation of water supply networks and the number of unknowns.

In case the diameters of the network lines are known, it is possible to unambiguously determine the flow rates in the network lines. Seeking costs q_{ik} are from the joint solution of the system $p = m + n + e - 1$ equations of Kirchhoff's I and II laws, of which $n + e - 1$ – nonlinear equations and $m - 1$ – linear equations of the type.

For branched networks without rings, the number of equations is determined by the relation $p = m + e - 1$. In the absence of characteristics of water feeders and non-fixed withdrawals, their number is reduced to $m - 1$.

In finding the flux distribution, compliance with the linear equations is achieved at the preliminary flux distribution stage [8].

In general, considering the equations of Kirchhoff's II law, it becomes clear that in addition to the unknowns q_{ik} to be found, they also include unknown line diameters d_{ik} . This is due to the fact that the S_{ik} values included in the head loss formula are expressed as a function of diameters. Thus, any change in the diameters of the network lines will lead to a redistribution of the costs flowing through them. On the other hand, the redistribution of flow rates leads to the need to assign new diameters. In this situation, one is faced (as mentioned above) with the task of technical and economic calculation. As a result of this calculation, $2p$ unknowns are to be found: p values of q_{ik} and the same number of d_{ik} values. To find all $2p$ unknowns simultaneously, the obtained equations are not sufficient.

Without referring at this stage to the methods of full technical and economic calculation, it can be concluded that the hydraulic calculation of networks should be carried out by specifying diameters. As it was mentioned above, the selection of diameters of individual network sections cannot be made completely arbitrarily, since the diameter, to a certain extent, is a function of the flow rate conducted by the pipe, so for accurate selection of diameters it is necessary to assign a preliminary flow distribution [6].

Description of the projected network

On the typical floor plan, the location of the water riser is selected, from which the water connections are made to the water outlets.

An axonometric diagram of the apartment wiring is drawn.

From the typical floor plan to the basement plan water risers are transferred to the basement plan and united by a main line at the shortest distance from the entrance to the building. If the risers are located on both sides of the central axis of the building, the main line is laid above the ceiling of the basement to the central bearing wall of the building. A water meter is installed behind the inlet, but not under the living space.

An axonometric scheme of the internal water supply network is constructed.

On the axonometric diagram of the internal water supply network, the design direction and the dictating point are selected.

The dictating point is the highest and most distant from the water intake point.

The design direction is the direction of the water distribution network from the inlet to the dictating point.

The design direction is divided into design sections.

The designed network of internal water supply is a dead-end network with bottom distribution, consisting of main, distribution water pipelines and connections to water-dispensing devices [8].

The pipe runs along the shortest distance and input pipe perpendicular to the outer wall of the building, taking into account $i = 0.003-0.005$ from the building to the external water supply network, for the possibility of emptying the system. Depending on the depth of filling of pipes of the city water supply system and the depth of freezing of the ground, since we do not have data on the depth of filling of the city water supply system, we determine the depth of filling of the input as:

$$H = H + 0.3 = 1.1 + 0.3 = 1.4 \text{ m} \quad (5)$$

To account for the flow of consumed water, in the basement of the building install a water-metering unit with a branch line located at a height of 0.2 m from the floor of the basement. For the designed network of internal water supply is selected water meter VKSM-32. A booster installation is provided, as a result of calculation the pump 1,5K-8/19b is selected.

The main pipeline is laid under the ceiling of the basement with a slope $i = 0.003$ at a distance of 0.2 m, on each riser valves are installed on the supply lines to the water dispensers [15].

CONCLUSION

In general, thanks to the research conducted in the areas of underground heat pipelines, the method has received a significant boost in development, new patterns have been identified, and additional evaluation criteria have been developed—software complexes for analyzing the state of heat networks in which the presence of magnetic field anomalies has occurred.

Zones of stress – strain state of compensation pipelines that are apparently intact, but have damage, are determined. While these regions may not cause large-scale disasters in the near future, more serious disruptions may develop in the future if attempts are not made to prevent compensation violations.

So far, the remaining actual wall thickness and the exact time before disconnection cannot be determined only by processing data from non-contact magnetic diagnostics, which requires drilling holes, or an accurate

description of the “cause of damage”, but now a constant set of data is required to improve the accuracy of forecasting the remaining pipeline resources and significantly develop in the future the detection of patterns of obsolescence of pipe metals in heating networks. and the analytical base extension has long been known.

REFERENCES

1. Zhurba M. G., Sokolov L. I., Govorova Zh. M. Water supply. Design of systems and structures: in 3 vols. Vol. 1 Water supply systems, water intake structures: a textbook. – Moscow: Publishing House of the Association of Construction Universities. – 2010. – 400 p.
2. Lipsky, V. K. Tekhnicheskaya gidromekhanika: ucheb.-method. / V. K. Lipsky, D. P. Komarovskiy; under the general editorship of V. K. Lipsky. – Novopolotsk: PSU. – 2011. – 245 p.
3. Dushkin S. S., Sorokina E. B., Blagodarnaya G. I. Water supply and sewerage. Kharkiv: KHGAGH. – 2013. – 51 p.
4. Dikarevsky V. S., Kurganov A.M., Nechaev A. P. et al. Diversion and treatment of surface wastewater – L.: Stroyizdat. Leningr. Ed. – 2011. – 136 p.
5. Orlov V. A., Orlov E. V. Construction, reconstruction and repair of water supply and drainage networks by trenchless methods – M: INFRAM-M. – 2011. – 75 p.
6. Aleshin N.P. (2013) Physical methods of non-destructive testing of welded joints.
7. Antonov A.V. (2012) Statistical models in reliability theory.
8. Bekher S.A. (2013) Fundamentals of non-destructive testing of the acoustic radiation method.
9. Brandon D. (2004) Microstructure of materials. Research and control methods.
10. Vetoshkin A.G. (2003) Reliability of technical systems and technogenic risk.
11. Viktorova V.S. (2016) Models and methods for calculating the reliability of technical systems.
12. Zatsepin A.F. (2016) Modern computer flaw detectors for ultrasonic testing and non-destructive testing.
13. Trofimov A.I. (2013) Piezoelectric transducers and signal filtering in ultrasonic flaw detection.
14. Fomin V.N. (2012) Radiographic quality control in welding production.
15. Semenov V.V., Movchan I.B. (2018) Non-contact magnetometric method for localizing and assessing technological anomalies in the structure of pipelines.

УЛЬТРАДЫБЫСТЫҚ ДЕФЕКТОСКОПИЯ ӘДІСІМЕН ИНЖЕНЕРЛІК КОММУНИКАЦИЯЛАРДЫ ТЕХНИКАЛЫҚ ЗЕРТТЕУ

Г. Н. Сембаева, І. Е. Алдаберген*

«Әбілқас Сағынов атындағы Қарағанды техникалық университеті» КЕАҚ, Қарағанды, Қазақстан

** Байланыс үшін: inkar94_kz@mail.ru*

Бұл мақала ішкі және сыртқы беттердегі коррозияны және басқа ақауларды анықтау үшін пайдаланылатын ұзын толқынды ультрадыбыстық радикс жүйелеріне ерекше назар аударады. Бұл жету қиын жерлерде ұзын құбырлардағы коррозияның және басқа ақаулардың болуын бақылауға мүмкіндік береді.

Қазіргі уақытта технологиялық құбырларды жобалау мен есептеуде қолданылатын тиісті мемлекеттік салалық стандарттар әзірленуде, бірақ әзірге сараптамалық мекемелер техникалық жағдайды диагностикалауға ерекше көңіл бөлгені дұрыс. Ол үшін ең дәл диагностикалық шешімдерді пайдалану және бүкіл жүйеге болжамды қамтамасыз ету қажет болады.

Түйін сөздер: қашықтағы методдар, электромагниттік сәулелену, ультракүлгін, құбырлар, ультрадыбыстық, флавты анықтау, радиациялық бақылау, акустикалық зерттеулер.

ТЕХНИЧЕСКОЕ ОБСЛЕДОВАНИЕ ИНЖЕНЕРНЫХ КОММУНИКАЦИЙ МЕТОДОМ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ ДЕФЕКТОСКОПИИ

Г. Н. Сембаева, І. Е. Алдаберген*

НАО «Қарағандинский технический университет имени Абылкаса Сагинова», Қарағанда, Қазақстан

** E-mail для контактов: inkar94_kz@mail.ru*

В статье рассматривается вопрос о необходимости уделять особое внимание длинноволновым ультразвуковым радиксным системам, используемым для обнаружения коррозии и других дефектов на внутренних и внешних поверхностях. Это позволяет контролировать наличие коррозии и других дефектов на длинных трубах в труднодоступных местах.

В настоящее время разрабатываются соответствующие государственные отраслевые стандарты, применяемые при проектировании и расчетах технологических трубопроводов, но пока экспертным учреждениям лучше уделить особое внимание диагностике технического состояния. Для этого необходимо будет использовать максимально точные диагностические решения и давать прогноз по всей системе.

Ключевые слова: дистанционные методы, электромагнитное излучение, ультрафиолет, трубопроводы, ультразвук, дефектоскопия, радиационный контроль, акустические исследования.

<https://doi.org/10.52676/1729-7885-2025-1-21-27>
УДК 533.9.082

РАЗРАБОТКА И ИСПЫТАНИЕ СИСТЕМЫ ДИАГНОСТИКИ НА ОСНОВЕ ТРОЙНОГО ЗОНДА ЛЕНГМЮРА НА ПЛАЗМЕННО-ПУЧКОВОЙ УСТАНОВКЕ

А. Ж. Миниязов¹, И. А. Соколов^{1,2}, Ә. Ж. Қайырбекова^{1,2*}, Т. Р. Туленбергенов^{1,2}, Ғ. Қ. Жанболатова¹

¹⁾ Филиал «Институт атомной энергии» РГП НЯЦ РК, Курчатов, Казахстан

²⁾ НАО «Университет имени Шакарима города Семей», Семей, Казахстан

* E-mail для контактов: kaiyrbekova@nnc.kz

В работе представлена разработка тройного зонда, состоящего из трех вольфрамовых электродов диаметром 1 мм, предназначенного для применения на плазменно-пучковой установке (ППУ). Выбраны соответствующие измерительное оборудование и электрическая схема подключения. Зонд успешно прошел пуско-наладочные испытания, в ходе которых выявлены ключевые факторы, важные для точной интерпретации результатов и интеграции в диагностическую систему ППУ. Экспериментальные измерения параметров плазмы с использованием тройного зонда показали сопоставимые результаты с одиночным зондом: температура электронов составила 7 эВ, а концентрация плазмы – 10^{16} м^{-3} . Полученные результаты эксперимента подтверждают корректную работу разработанного зонда и его применение в экспериментах вследствие простоты обработки данных по сравнению с другими видами зондов.

Ключевые слова: тройной зонд Ленгмюра, низкотемпературная плазма, диагностика плазмы, вольт-амперная характеристика, функция распределения электронов по энергиям

ВВЕДЕНИЕ

Исследования в области управляемого термоядерного синтеза (УТС) становятся все более актуальными. Этот вид генерации в будущем позволит внести существенный вклад в решение проблемы устойчивого и безопасного производства энергии для обеспечения растущего мирового спроса [1]. Токамаки и линейные плазменные установки представляют собой перспективные системы для исследований и развития УТС. Неотъемлемой частью любых исследовательских или энергетических установок в этой области является система диагностики для исследования и измерения параметров плазмы.

Параметры плазмы играют важную роль при исследовании ее поведения и взаимодействия потоков энергии от нее с поверхностью конструкционных материалов термоядерного реактора. Важность этих исследований связана с условиями работы первой стенки и дивертора в реакторе под мощным воздействием потоков энергии со стороны плазмы. Для таких исследований используются в том числе линейные плазменные установки, позволяющие моделировать воздействие на материалы стенки реактора при заданных характеристиках потока плазмы. Эти плазменные установки, или линейные симуляторы, должны удовлетворять ряду требований, а именно: высокая плотность и однородность плазмы, отсутствие примесей и возможность стационарного режима работы. Принцип работы линейных симуляторов плазмы заключается в транспортировке интенсивного электронного пучка через газ низкого давления, где в присутствии магнитного поля реализуется пучково-плазменный разряд (ППР). Плазменно-пучковая установка (ППУ) удовлетворяет всем указанным требованиям [2–3].

На линейных симуляторах активно применяются методы зондовой диагностики. Например, электрические зонды Ленгмюра позволяют определить следующие параметры плазмы: плотность электронов n_e , электронную температуру T_e , потенциал плазмы U_{pl} , плавающий потенциал U_{pl} . Помимо этого дать оценку по функции распределения электронов по энергиям [4–9]. Электрические зонды Ленгмюра применяются во многих токамаках, таких как DIII-D [10], JT-60 [11], EAST [12, 13], KSTAR [14] и W7-X [15, 16], а также на линейных установках PISCES, NAGDIS-II, PSI, ЛЕНТА, ПР-2 [17].

Чаще всего в установках используются одиночные и двойные зонды [18–21]. Электрод одиночного зонда соединяется с источником пилообразного напряжения, находится под положительным или отрицательным потенциалом относительно плазмы, тем самым измеряя зависимость тока от прикладываемого напряжения. Двойной зонд состоит из двух электродов, обычно равных по площади, которые находятся в контакте с плазмой. В этом случае измеряют ток, протекающий в плазме между электродами, в зависимости от приложенного между ними напряжения. Основной особенностью при использовании одиночных и двойных зондов является необходимость подачи развертки напряжения на зонд для получения соответствующей вольт-амперной характеристики (ВАХ).

В настоящее время для диагностики плазмы активно используется тройной зонд Ленгмюра. Его преимущество заключается в том, что нет необходимости построения ВАХ, как при использовании одиночных и двойных зондов, с помощью электрической развертки напряжения. Подходящего тройного зонда для ППУ нет. Исходя из этого, с учётом важности и актуальности работ, определена цель настоящей работы: разработать тройной зонд Ленгмюра для измерения параметров плазмы на ППУ.

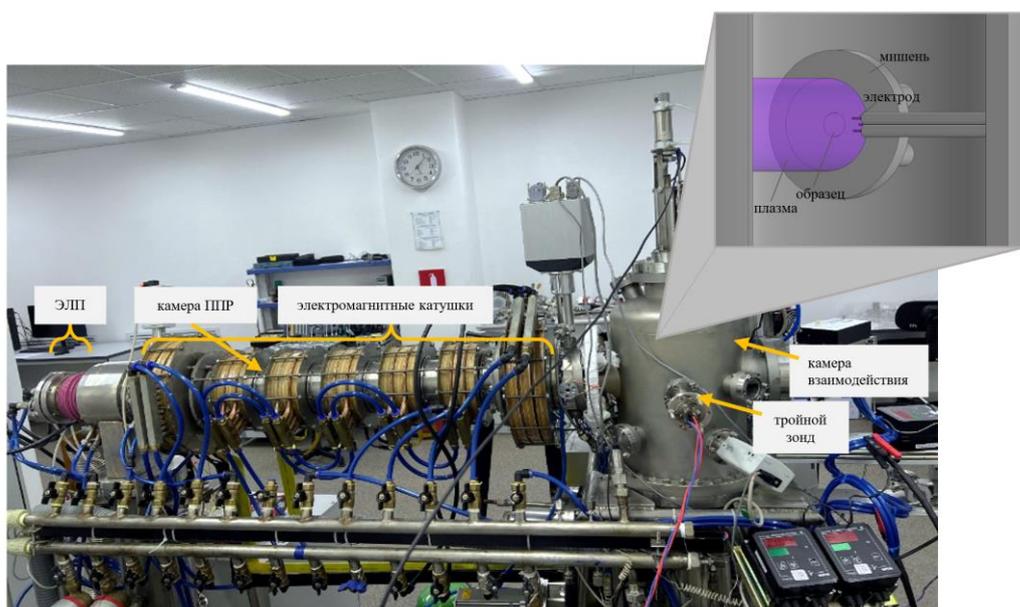


Рисунок 1. Общий вид основных элементов ППУ

Решались следующие задачи: разработать и испытать тройной зонд, который будет обеспечивать одновременные измерения температуры и концентрации электронов с возможностью пересчета электрических параметров зондовой цепи в локальные параметры плазмы через простые соотношения.

1. ОБОРУДОВАНИЕ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Облучение материала плазмой происходит в камере взаимодействия ППУ, которая имеет ряд боковых фланцев. Они, в свою очередь, позволяют проводить монтаж диагностических приборов, визуальное наблюдение и оптическую спектроскопию плазмы. На одном из боковых фланцев CF40 установлен тройной зонд, как показано на рисунке 1.

Конструкция тройного зонда

На основе аналитического обзора литературы [22–26] для разработки тройного электростатического зонда выбраны две конструкции с разным расположением электродов, показанные на рисунке 2. Выбор оптимальной конфигурации расположения электродов зонда связан с особенностями конкретной задачи. Поэтому большое внимание уделяется разработке электрических схем зондовых диагностик и расположению зонда для проведения достоверных измерений параметров плазмы. Как видно из рисунка 2, зонд состоит из трех идентичных измерительных вольфрамовых электродов определенной длины с изоляторами из керамической трубки. Материалы зонда выбраны с учетом механической прочности, температуры плавления, шероховатости поверхности и электрической проводимости. Диаметр каждого электрода составляет 1 мм, длина каждого электрода – 4 мм.

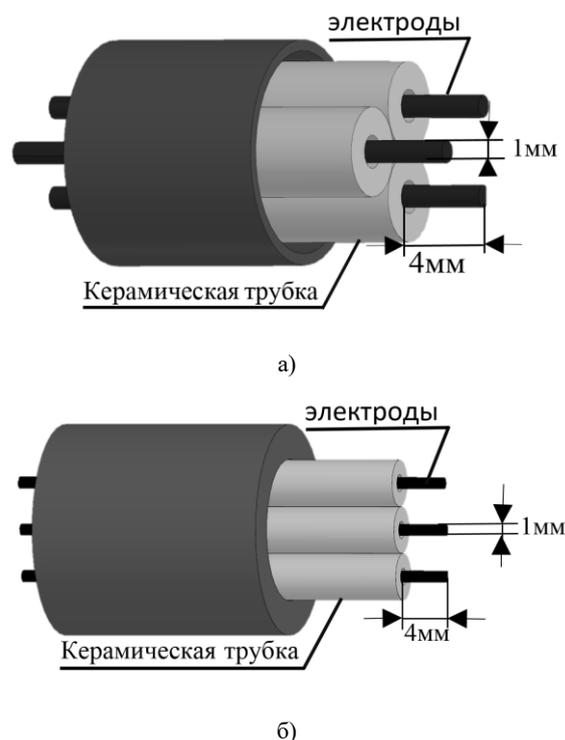
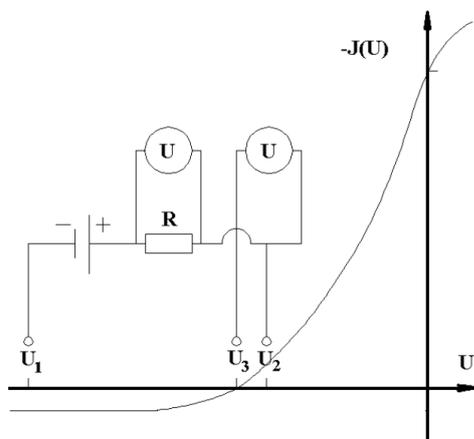


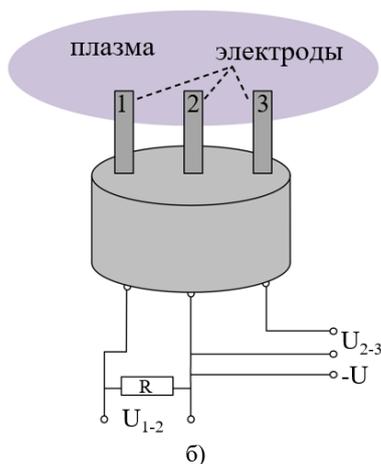
Рисунок 2. Схема измерительного участка тройного зонда с расположением электродов в виде треугольника (а) и в один ряд (б)

Схема включения зонда

Электрическая схема измерения и подключения тройного зонда представлена на рисунке 3 [26].



а)



б)

Рисунок 3. Потенциалы на электродах тройного Ленгмюровского зонда (а) и электрическая схема подключения тройного зонда (б)

Для корректного подключения тройного зонда и получения необходимых данных использовались следующие приборы и оборудование:

- блок питания КЕРСО для подачи нужного потенциала;
- резистор сопротивлением 93 Ом для ограничения тока и защиты зонда;
- осциллограф TPS2012В для регистрации сигналов тока и напряжения;
- мультиметр Uni-T для измерения значений тока и напряжения.

При использовании тройного зонда вся схема измерения должна быть заземлена. До начала эксперимента два электрода 1 и 2 находятся под постоянным потенциалом. Третий электрод оказывается под плавающим потенциалом плазмы. В результате между вторым и третьим электродами возникает разность потенциалов, равная $U_{2,3}$.

Токи, протекающие по трем электродам тройного зонда, будут равны [23]:

$$I_1 = I_{i0} + I_{e0} \cdot \exp\left(-\frac{eU_1}{kT_e}\right), \quad (1)$$

$$I_2 = I_{i0} + I_{e0} \cdot \exp\left(-\frac{eU_2}{kT_e}\right), \quad (2)$$

$$I_3 = I_{i0} + I_{e0} \cdot \exp\left(-\frac{eU_3}{kT_e}\right). \quad (3)$$

где I_1, I_2, I_3 и U_1, U_2, U_3 – токи и потенциалы на электродах зонда; I_{e0} – электронный ток насыщения; I_{i0} – ионный ток насыщения; e – элементарный заряд, Кл; k – постоянная Больцмана ($k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К); T_e – температура электронов, эВ.

Разделив уравнение (2) на уравнение (3), применив математические операции и учитывая, что $I_{e0} = -I_{i0}$ [23], получим выражение, по которому можно определить температуру электронов [27, 28]:

$$kT_e = \frac{eU_{2-3}}{\ln 2} = \frac{e(U_2 - U_3)}{\ln 2} = \frac{e(U_2 - U_{плав.})}{\ln 2}, \quad (4)$$

где k – постоянная Больцмана ($k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К); T_e – температура электронов, эВ.

На основе известного значения электронной температуры из уравнения (5) вычисляется концентрация электронов [23]:

$$n_e = \frac{-I_{i0}}{eS \sqrt{\frac{eT_e}{M_i}} \left(\exp\left(\frac{U_{2-3}}{T_e}\right) - 1 \right)}, \quad (5)$$

где e – элементарный заряд, Кл; S – площадь электрода зонда, m^2 ($S = S_1 = S_2 = S_3$); M_i – масса иона, кг; T_e – температура электронов, эВ; U_{2-3} – разность потенциалов между электродами 2 и 3; I_{i0} – ионный ток насыщения. Поскольку электроды 1 и 2 имеют одинаковые значения потенциала, но с противоположными знаками, разность потенциалов между ними позволяет определить ионный ток насыщения I_{i0} в тройном зондовом методе.

2. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Экспериментальная часть

После монтажных работ производилось вакуумирование полостей камер ППУ форвакуумными насосами до давления 10^{-2} Торр, затем турбомолекулярными насосами до вакуума порядка 10^{-6} Торр. После достижения стационарного давления запускалась ЭЛП и электромагнитная система фокусировки ППР для формирования электронного пучка. Далее в камеры ППУ напускался водород, и установка переходила в режим ППР, генерируя плазму.

Эксперименты для водородной плазмы проводились в соответствии с условиями, описанными в таблице 1.

**РАЗРАБОТКА И ИСПЫТАНИЕ СИСТЕМЫ ДИАГНОСТИКИ НА ОСНОВЕ
ТРОЙНОГО ЗОНДА ЛЕНГМЮРА НА ПЛАЗМЕННО-ПУЧКОВОЙ УСТАНОВКЕ**

Таблица 1. Условия проведения экспериментов на ППУ в среде водорода

Параметры эксперимента	Значение
Ускоряющее напряжения, В	500–3500
Отрицательный потенциал в коллекторе, В	заземлен
Диапазон давление рабочего газа, мТорр	1–5
Диаметр электронного пучка, мм	≤5
Напряженность магнитного поля на оси ППР, Тл	0,1
Рабочий газ	H ₂
Расстояние электрода зонда от центра оси, мм	0–1

На рисунке 4 представлено расположение и процесс измерения характеристик плазмы тройного и одиночного зондов в камере взаимодействия.



а)



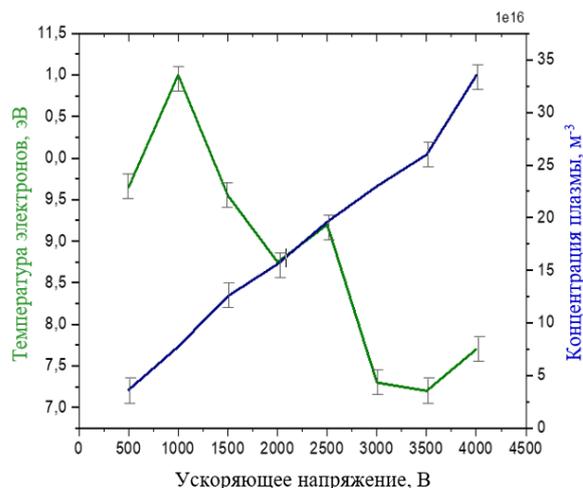
б)

Рисунок 4. Плазменный разряд с расположением электродов зонда в виде треугольника (а) и в один ряд (б)

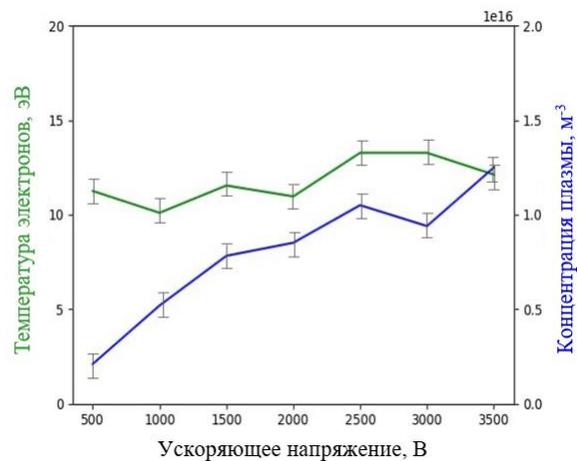
При проведении пусконаладочных работ (ПНР) на ППУ обнаружено, что конструкция тройного зонда с расположением электродов в виде треугольника (рисунок 4а) не позволила получить экспериментальные данные. Так как электроды расположены слишком близко, возник эффект взаимного влияния токов. Дальнейшие ПНР проводились с использованием тройного зонда с расположением электродов в ряд.

Анализ полученных данных

В ходе экспериментов получены зависимости параметров плазмы от напряжения ЭЛП. На рисунке 5 представлены графики, показывающие результаты измерений, выполненных с помощью одиночного (а) и тройного зонда (б).



а)



б)

Рисунок 5. Графики зависимости параметров плазмы от напряжения ЭЛП, полученные с помощью одиночного (а) и тройного зонда (б)

На рисунке 5б видно, что при увеличении напряжения с 500 В до 3500 В для давления $1,1 \cdot 10^{-3}$ в плазме значения T_e и n_e , полученные с помощью тройного зонда, увеличиваются. Рост T_e может быть обусловлен увеличением кинетической энергии электронов с повышением напряжения источника ЭЛП. Согласно теории зонда следует, что параметр n_e зависит от kT_e , т.к. при высокой температуре электроны имеют большую кинетическую энергию, что увеличивает вероятность их взаимодействия с зондом. Соответственно, чем выше температура, тем больше количество электронов с достаточной энергией для достижения зонда. Это влияет на распределение электронов и,

следовательно, на измеренные параметры плазмы, такие как плотность и ток электронов. Увеличение n_e вызвано увеличением скорости ионизации в разрядной плазме при увеличении напряжения. Это приводит к изменению тока ионного насыщения, зависящему от плотности. Таким образом, ток ионного насыщения зависит от количества ионов, которые достигают зонда. Когда концентрация плазмы (точнее электронов) увеличивается, возрастает вероятность столкновений и ионизации, что приводит к повышению количества ионов, движущихся к поверхности зонда. В результате ток ионного насыщения, который определяется количеством ионов, достигающих зонда, также увеличивается.

В результате при увеличении входной мощности в системе плазменного разряда повышается температура электронов, что приводит к большему числу ионизационных событий и, следовательно, к большей вероятности ионизации, особенно при низких давлениях газа. Ниже в таблице 2 приведены данные по T_e и n_e в условиях давления газа при постоянной мощности электронного пучка 30 Вт.

Таблица 2. Температура и концентрация электронов от давления газа при различных значениях

U , кВ	P , Торр	Одиночный зонд		Тройной зонд	
		T_e , эВ	n_e , м ⁻³	T_e , эВ	n_e , м ⁻³
2	$1,3 \cdot 10^{-3}$	7	$1,26 \cdot 10^{16}$	7	$1,0 \cdot 10^{16}$
2	$4,4 \cdot 10^{-3}$	7	$3,07 \cdot 10^{15}$	7,3	$2,4 \cdot 10^{15}$

При увеличении давления газа при постоянной входной мощности величина n_e уменьшается. Это может быть обусловлено тем, что вследствие увеличения давления газа внутри плазменной камеры плазма в разряде охлаждается, в результате чего уменьшаются сила тока ионного насыщения и плотность электронов n_e .

При высоком давлении и относительно малой входной мощности упругие столкновения могут приводить к уменьшению скорости ионизации. Также при высоком давлении высокоэнергетичный «хвост» функции распределения электронов «истощается», количество электронов с энергией, достаточной для осуществления процессов столкновительной ионизации, уменьшается, что ведет к снижению плотности электронов n_e . Это «истощение хвоста» функции распределения электронов по энергиям может быть вызвано также быстрой диффузией и рекомбинацией высокоэнергетичных электронов на стенках камеры [29, 30]. Однако во втором эксперименте значения электронной температуры и плотности, полученные в зондовых измерениях на ППУ хорошо совпадают с данными одиночного зонда.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате выполненной работы реализована конструкция тройного зонда, состоящая из трех изолированных вольфрамовых электродов диаметром 1 мм с учетом эксплуатации вакуумной техники. Так-

же произведен подбор измерительного оборудования и реализована электрическая схема включения подходящая для ППУ. На ППУ проведен монтаж разработанного зонда и пуско-наладочные работы. Необходимо отметить, что в процессе реализации задач выявлены несколько факторов (расстояние между электродами, ионизации атомов газа), которые необходимо учитывать для правильной интерпретации результатов измерений и при дальнейшем внедрении тройного зонда в диагностическую систему ППУ.

Получены первые результаты экспериментов по определению параметров плазмы методом тройного зонда. Значения электронной температуры составило 7 эВ, а концентрация плазмы 10^{16} м⁻³. Таким образом разработанный тройной зонд позволяет измерять параметры плазмы без развертки напряжения, как при использовании одиночных и двойных зондов. Это существенно упрощает процесс диагностики плазмы. Можно утверждать, что разработанный зонд функционирует корректно и будет модернизирован для проведения дальнейших экспериментальных работ.

Данные исследования финансировались Министерством энергетики Республики Казахстан в рамках научно-технической программы BR23891779 «Научно-техническое обеспечение экспериментальных исследований на Казахском материаловедческом токамаке КТМ».

ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES

1. <https://www.iter.org/proj/inafewlines>.
2. Патент РК № 2080. Имитационный стенд с плазменно-пучковой установкой / Колодешников А.А., Зуев В.А., Гановичев Д.А., Туленбергенов Т.Р. [и др.]; заявитель и патентообладатель РГП НЯЦ РК. – № 2016/0108.2; заявл. 29.02.2016; опубл. 15.03.2017, Бюл. № 5.– 3 с. [Patent RK No. 2080. Imitatsionnyy stend s plazmenno-puchkovoy ustanovkoy / Kolodeshnikov A.A., Zuev V.A., Ganovich D.A., Tulenbergenov T.R. [i dr.]; zayavitel' i patentoobladatel' RGP NYaTs RK. – No. 2016/0108.2; zayavl. 29.02.2016; opubl. 15.03.2017, Byul. No. 5.– 3 p. (In Russ.)]
3. Chektybayev B.Zh., Skakov M.K., Tulenbergenov T.R., Sokolov I.A., Miniyazov A.Zh., Zhanbolatova G.K., Naurzybayev R.Zh. Measurement of plasma parameters in the PBI using the Langmuir probe // Fusion Engineering and Design. –2024.– Vol. 205.– P. 114546. <https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2024.114546>
4. Bhattarai Sh., Nath Mishra L. Theoretical Study of Spherical Langmuir Probe in Maxwellian Plasma // International Journal of Physics. – 2017. –Vol. 5(3). –P. 73–81. <https://doi.org/10.12691/ijp-5-3-2>.
5. Godyak V.A., Piejak R.B., Alexandrovich B.M. Measurement of electron energy distribution in low-pressure RF discharges // Plasma Sources Science and Technology. – 1992. –Vol. 1. –P. 36. – <https://doi.org/10.1088/0963-0252/1/1/006>
6. Crowley B., Dietrich S.A. Langmuir probe system incorporating the Boyd–Twiddy method for EEDF measurement applied to an inductively coupled plasma source //

- Plasma Sources Science and Technology. – 2009. – Vol. 18. – P. 014010. <https://doi.org/10.1088/0963-0252/18/1/014010>
7. Chen F.F. Langmuir probes in RF plasma: surprising validity of OML theory // Plasma Sources Science and Technology. – 2009. – Vol. 18. – P. 035012. <https://doi.org/10.1088/0963-0252/18/3/035012>
 8. Bang J.Y., Chung C.W., 2010 Phys. Plasmas
 9. Merlino R.L. Understanding Langmuir probe current-voltage characteristics // American Association of Physics Teachers. – 2007. – Vol. 75. – P. 1078.
 10. Ovsyannikov A.A. Zhukov M.F. Plasma diagnostics. – Cambridge International Science Publishing: Cambridge, UK, 2000.
 11. Buchenauer D., Hsu W. L., Smith J. P., Hill D.N. Langmuir Probe Array for the DIII-D Divertor // Review of Scientific Instruments. – 1990. – Vol. 61. – P. 2873. <https://doi.org/10.1063/1.1141811>
 12. Asakura N., Shimizu K., Hosogane N., Itami K., Tsuji S., Shimada M. Recycling Enhancement with n_e and Q_{eff} in High-Density Discharges on JT-60U // Nuclear Fusion. – 1995. – Vol. 35. – P. 381
 13. Xu J. C. et al. Upgrade of Langmuir probe diagnostic in ITER-like tungsten mono-block divertor on experimental advanced superconducting tokamak // Review of Scientific Instruments. – 2016. – Vol. 87. – P. 083504. <https://doi.org/10.1063/1.4960181>
 14. Ming T. F. et al. Improvement of divertor triple probe system and its measurements under full graphite wall on EAST // Fusion Engineering and Design. – 2009. – Vol. 84. – P. 57. <https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2008.10.005>
 15. Bak J. G., Lee S.G., Kim J.Y. Electrical Probe Diagnostics for KSTAR // Contributions to Plasma Physics. – 2010. – Vol. 50. – P. 892. <https://doi.org/10.1002/ctpp.201010151>
 16. Hammond K. C. et al. Drift effects on W7-X divertor heat and particle fluxes // Plasma Physics and Controlled Fusion. – 2019. – Vol. 61. – P. 125001. <https://doi.org/10.1088/1361-6587/ab4825>
 17. Pandey S., Carls A. Pop-up Langmuir probe diagnostic in the water cooled divertor of Wendelstein 7-X // Review of Scientific Instruments. – 2024. – Vol. 95(4). – P. 043503. <https://doi.org/10.1063/5.0188738>
 18. Туленбергенов Т.Р., Соколов И.А., Миниязов А.Ж., Кайырды Г.К., Ситников А.А. Обзор по линейным ускорителям // Вестник НЯЦ РК. – 2019. – Вып. 4. – С. 59–67 [Tulenbergenov T.R., Sokolov I.A., Miniyazov A.Zh., Kayyrdy G.K., Sitnikov A. A. The linear accelerators review // NNC RK Bulletin. – 2019. Issue 4. – P. 59–67. (In Russ.)]. <https://doi.org/10.52676/1729-7885-2019-4-59-67>
 19. Jang S. H., Kim G. H., Chung C. W. In situ method for real time measurement of dielectric film thickness in plasmas // J. Appl. Phys. – 2010. – Vol. 107. – P. 023303.
 20. Sobolewski M. A. Measuring the ion current in high-density plasmas using radio-frequency current and voltage measurements // J. Appl. Phys. – 2001. – V. 90. – P. 2660–2671.
 21. Mehs D. M., Niemczyk T. M. Plasma models applicable to low pressure discharges // Spectrochim. Acta. Pt B. – 1981. – Vol. 36. – P. 965–971.
 22. Райзер Ю.П. Физика газового разряда. – Долгопрудный: Интеллект, 2009. [Rayzer Yu.P. Fizika gazovogo razryada. – Dolgoprudnyy: Intellect, 2009. (In Russ.)]
 23. Qayyum A., Ahmad N., Ahmad S., Deeba F., Ali R., Hussain S. Time-resolved measurement of plasma parameters by means of triple probe // Review of Scientific Instruments. – 2013. – Vol. 84. – P. 123502. <https://doi.org/10.1063/1.4838658>.
 24. Naz M.Y. Ghaffar A. Double and triple Langmuir probes measurements in inductively coupled nitrogen plasma // Progress In Electromagnetics Research. – 2011. – Vol. 114. <https://doi.org/10.2528/PIER10110309>.
 25. Chen Sin-Li., Sekiguchi T. Instantaneous Direct-Display System of Plasma Parameters by Means of Triple Probe // Journal of Applied Physics. – 1965. – Vol. 36. – № 8. <https://doi.org/10.1063/1.1714492>
 26. Bondarenko D. et al. Engineering design of plasma generation devices using Elmer finite element simulation methods // Engineering Science and Technology. – 2016. <https://doi.org/10.1016/j.jestech.2016.07.015>
 27. Roussel R., Andonian G., Hansel C., Lawler G., Lynn W., Majernik N., Robles R., Sanwalka K., Wisniewski E., Rosenzweig J. Externally Heated Hollow Cathode Arc Plasma Source for Experiments in Plasma Wakefield Acceleration // Instruments. – 2019. – Vol. 3. – P. 48.
 28. Amrollahi R., Mirzaei H.R., Ghasemi M. Optimizing the Plasma startup through ECR plasma pre-ionization in Taban Tokamak via Triple Langmuir probe // Fusion Engineering and Design. – 2020. – Vol. 150. – P. 111362. <https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2019.111362>
 29. Qin Y. Improved treatment of triple-probe data for determination of electron temperature // Review of Scientific Instruments. – 2005. – Vol. 76(11). – P. 116102. <https://doi.org/10.1063/1.2130935>
 30. Yong-ik S., Lim H. B., Houk R. S. Diagnostic studies of low-pressure inductively coupled plasma in argon using a double Langmuir probe // J. Anal. Atom. Spectrometry. – 2002. – Vol. 17. – P. 565–569.
 31. Itagaki N., Iwata S., Muta K., et al. Electron-temperature dependence of nitrogen dissociation in 915 MHz ECR plasma // Thin Solid Films. – 2003. – Vol. 435. – P. 259–263.

ПЛАЗМАЛЫ-ШОҚТЫҚ ҚОНДЫРҒЫДА ҮШТІК ЛАНГМЮР ЗОНДЫНЫҢ НЕГІЗІНДЕ ДИАГНОСТИКА ЖҮЙЕСІН ӘЗІРЛЕУ ЖӘНЕ СЫНАУ

А. Ж. Миниязов¹, И. А. Соколов^{1,2}, Ә. Ж. Қайырбекова^{1,2*}, Т. Р. Туленбергенов^{1,2}, Ғ. Қ. Жанболатова¹

¹) ҚР ҰЯО РМК «Атом энергиясы институты» филиалы, Курчатов, Қазақстан

²) «Семей қаласындағы Шақарым атындағы университет» КЕАҚ, Семей, Қазақстан

* Байланыс үшін E-mail: kaiyrbekova@nnc.kz

Жұмыста плазмалы-шоқтық қондырғыда (ПШҚ) пайдалануға арналған диаметрі 1 мм болатын үш вольфрам электродтарынан тұратын үштік зондтың құрастырылуы ұсынылған. Тиісті өлшеу жабдығы мен электрлік қосылу схемасы таңдалынды. Зонд іске қосу сынақтарын сәтті аяқтады, оның барысында нәтижелерді дәл түсіндіру және ПШҚ диагностикалық жүйесіне интеграциялау үшін маңызды негізгі факторлар анықталды. Үштік зонд арқылы плазма параметрлерін эксперименттік өлшеу дара зондпен салыстырмалы нәтижелерді көрсетті: электрон температурасы 7 эВ және плазма концентрациясы – 10^{16} м^{-3} болды. Алынған эксперименттің нәтижелері әзірленген зондтың дұрыс жұмысын және оны зондтардың басқа түрлерімен салыстырғанда деректерді өңдеудің қарапайымдылығына байланысты эксперименттерде қолдануды растайды.

Түйін сөздер: үштік Ленгмюр зонды, төмен температуралы плазма, плазмалық диагностика, вольт-амперлік сипаттама, электрон энергиясын бөлу функциясы.

DEVELOPMENT AND TESTING OF A SYSTEM DIAGNOSTIC BASED ON A TRIPLE LANGMUIR PROBE IN A PLASMA-BEAM INSTALLATION

A. Zh. Miniyazov¹, I. A. Sokolov^{1,2}, A. Zh. Kaiyrbekova^{1,2*}, T. R. Tulenbergenov^{1,2}, G. K. Zhanbolatova¹

¹) Branch “Institute of Atomic Energy” RSE NNC RK, Kurchatov, Kazakhstan

²) NP JSC “Shakarim University of Semey City”, Semey, Kazakhstan

* E-mail for contacts: kaiyrbekova@nnc.kz

The paper presents the development of a triple probe consisting of three tungsten electrodes with a diameter of 1 mm, intended for applications on a plasma beam installation (PBI). The appropriate measuring equipment and electrical wiring diagram have been selected. The probe has successfully passed the commissioning tests, during which key factors were identified that are important for accurate interpretation of the results and integration into the diagnostic system of the PBI. Experimental measurements of plasma parameters using a triple probe showed comparable results with a single probe: the electron temperature was 7 eV, and the plasma concentration was – 10^{16} m^{-3} . The experimental results obtained confirm the correct operation of the developed probe and its use in experiments due to the simplicity of data processing compared with other types of probes.

Keywords: triple probe Langmuir, low-temperature plasma, plasma diagnostics, volt-ampere characteristic, electron energy distribution function.

<https://doi.org/10.52676/1729-7885-2025-1-28-37>

УДК 623.746.-519; МРНТИ 29.31.29

ДАЛА ӨРТІНЕ ҚАРСЫ ОПТИКАЛЫҚ ЖӘНЕ ЖЫЛУ МОДЕЛЬДЕРІ: ҰҰА МЕН ТЕЛЕМЕТРИЯ ИНТЕГРАЦИЯСЫ

Х. Молдамұрат, Д. М. Калманова, Ө. К. Әбдірашев*, Ғ. А. Әнуар, Ә. Ақан

Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Астана, Қазақстан

* Байланыс үшін E-mail: abdirashev_ok@enu.kz

Бұл мақалада Қазақстан Республикасындағы орман және дала өрттерінің өзекті мәселелері, олардың жиілігінің артуы, экожүйелер мен экономикаға, сондай-ақ адам қауіпсіздігіне әсері қарастырылды. Өрттерді бақылау мен басқаруда заманауи технологияларды, соның ішінде ұшқышсыз ұшу аппараттарын (ҰҰА) пайдалану қажеттілігі талқыланады. Компьютерлік бағдарламалауда физикалық құбылыс ретінде жылу процесін модельдеу үшін Стефан-Больцман заңының математикалық формуласы қолданылды. Рухон бағдарламасындағы есептеулер нәтижесінде жылу ағынының қашықтық пен түтін коэффициентіне тәуелділігі расталды. Зерттеу барысында өртті ерте ескерту үшін оптикалық және жылулық көрсеткіштерді бағалау әдістемесіне негізделген жылу сәулеленуін есептеу нәтижелері алынған. ҰҰА мен телеметрия интеграциясының өрт жағдайларын бақылауды жақсартатыны, нақты уақытта ақпаратты жедел алу арқылы өртті болжау дәлдігін арттыратыны көрсетілді. Бұл тәсіл экожүйелер мен адамдардың өмірін қорғаудың маңызды әдісі ретінде ұсынылады.

Түйін сөздер: дала өрттері, ұшқышсыз ұшу аппараты, геоақпараттық жүйелер, оптикалық модельдеу, жылу модельдеу, телеметрия, датчиктер мен сенсорлар.

КІРІСПЕ

Қазақстан Республикасында соңғы жылдары дала өрттері, соның ішінде орман өрттері орын алуда, өрт салдары экожүйелер мен адам қауіпсіздігіне ең үлкен қауіп төндіруде. Жыл сайын олардың жиілігі мен қарқындылығы артуда, көбінесе климаттың өзгеруі, адамның іс-әрекеті және өртті абайсыз пайдалану нәтижесінен туындауда.

Дала өрттері – экожүйеге, экономикаға және қоғамға айтарлықтай әсер ететін күрделі табиғи және антропогендік құбылыс. Қазақстан аумағында дала өрттері орманды-дала және шөлейтті аймақтарда жиі кездесіп, табиғи ресурстарға, ауыл шаруашылығына және халықтың өмір сүру жағдайына кері ықпал етеді. Климаттың өзгеруі, құрғақшылықтың күшеюі және антропогендік факторлардың артуы бұл мәселеге ерекше назар аударуды талап етеді.

Әлемде дала өрттерімен күресудің әртүрлі әдістері мен стратегиялары әзірленіп, қолданысқа енгізілуде. Соңғы жылдары ғарыштық мониторинг, жасанды интеллект, дрондар мен заманауи сенсорлық жүйелерді пайдалану дала өрттерін ерте анықтау мен тиімді сөндірудің басты құралдарына айналды. Осы зерттеуде дала өрттерінің Қазақстан үшін өзектілігі қарастырылып, оларды болжау, бақылау және алдын алу бойынша халықаралық ғылыми тәжірибе мен озық технологиялар талданады. Бұл зерттеу дала өрттерін басқару саласындағы заманауи әдістер мен олардың Қазақстандағы қолдану мүмкіндіктерін анықтауға бағытталған. Сондай-ақ, халықаралық ғылыми практика негізінде өрттің алдын алу, таралуын болжау және тиімді сөндіру әдістеріне әдебиеттік шолу жасалады.

Бұл тұрғыда орман өрттерін бақылау мен басқарудың тиімді әдістерін әзірлеу қажеттілігі туын-

дайды, бұл экологиялық, экономикалық және әлеуметтік салдарға байланысты елеулі шығындарды ескере отырып, қауіпсіздігіміз үшін өзекті мәселелердің бірі болып табылуда. Өткен жылдардағы 2021 жылғы 10 мамырда Қазақстанның шығысындағы Риддерде ауқымды өрт болды. Өрт орманды алқаптан қалаға тез тарады. Өрттің қатты болғаны соншалық, Риддерде төтенше жағдай жарияланды. Өрт барысында сөндіруге 86 бірлік техника, екі тікұшақ және 528 адам қатысты. Өрт екі күннен кейін – 12 мамырда сағат 14:30-да сөндірілді. Бірақ содан кейін де ғимараттар бірнеше күн бойы жанып, түтіндеуін жалғастырды, осыған дейін де орманда қысқа өрт ошақтары пайда болды. Орман өртінің жалпы ауданы 276,4 гектарды, материалдық шығын – 252 миллион 472 мың 463 теңгені құрады [1].

Өрт салдарынан 51 учаске зардап шекті, 31 тұрғын үй толығымен өртенді, 13 учаскеде тұрғын үйлер зардап шеккен жоқ, 37 шаруашылық ғимараттар, АВТО шеберхана, алты автомобиль, автомобиль тіркемесі, қарда жүретін көлік өрттен жойылды. Басқа мүліктер де өрттен зақымдалды: құрылыс материалдары, отын, қоршаулар, жеке заттар және т.б. адамдар ешнәрсемен – баспанасыз, құжаттарсыз және заттарсыз қалды.

Қазақстанда өрттер негізінен жазда және күзде болады, олар әсіресе ормандарға әсер етеді; ауыл шаруашылығына да айтарлықтай экономикалық зиян келтіреді. Қазақстан аумағы 2 миллион 700 мың шаршы шақырымнан астам аумақты алып жатыр. Бұл аумақтың шамамен 5%-ын ормандар немесе орманды аумақтар алып жатыр. «Жасыл Ел 2022» мемлекеттік бағдарламасына сәйкес, қолданыстағы орман қорының үлесін ұлғайту және сақтау туралы айтылды. Жақында, 2022 жылдың қыркүйегінде

Қостанай облысында өрт салдарынан 43 мың гектар орман зардап шекті, бұл Қазақстанда орын алған соңғы маңызды төтенше жағдай [2].



1 сурет. Риддер қаласының ТЖК

Деректерге сүйенетін мысалдар көптеп кездесуде. 2023 жылдың 8 маусымында Абай облысының 8 маусым күні сағат 12:03-те Семей қаласынан 25 шақырымдай қашықтықтағы Батпаев орман шаруашылығының 66 кварталында өрт шыққаны туралы хабар түсті. Өрт найзағайдың 2 рет соғуынан шыққан. Өрт 13 шілде күні сағат 13:00-де толығымен сөндірілді [3].



2 сурет. Қостанай облысындағы өрт көрінісі

Өртенген учаскенің жалпы ауданы 60 000 гектарды құрады. Жұмылдырылған күштер мен құралдардың көмегімен жалын 14 маусымда сағат 21:00-де оқшауланған еді, алайда бір ай өткен соң ғана толық сөндірілді. Google Earth деректері осы зерттеу аймағында қарағай, терек, қайың және басқа ағаштардан тұратын қалың орманды көрсетеді. Бұл орманды алқапты дала қоршап жатыр. Семей қаласы осы орман алқабының оңтүстік жағында орналасқан және оған іргелес орналасқан (3-сурет).



3 сурет. 2023 жылдың 8 маусымында Абай облысындағы өрт

Өрт ошақтары туралы мысалдар көптеп келтіруге болады. Олардың нақты уақыттағы жағдайын тікелей анықтайтын жүйе әлі толық қолданыста жоқ, сонымен қатар өрт ошақтарын алдын ала анықтау мен болжау әдістеріде жоқтың қасы [4].

Сондықтан арнайы ұшқышсыз ұшу аппараттары (ҰҰА) арқылы дала өрттерін зерттеуге және нақты уақытта оқиға орнын тікелей бақылап ақпарат алуда бұл - таптырмайтын әдіс. ҰҰА сияқты заманауи технологиялар орман өрттерін бақылауды жақсартудың бірегей мүмкіндіктерін ұсынады. Ағымдағы жағдайлар мен ықтимал қауіптер туралы жедел ақпарат алуға мүмкіндік беретін орман алқаптарының аумағы мен жай-күйі туралы деректерді жинау үшін ҰҰА жылдам барлауға болады. Ұшқышсыз ұшу аппараттарымен бірге телеметрия құрылғысын пайдалану температура, ылғалдылық, оптикалық қасиеттер және өрт қаупін талдау және оның салдарын бағалау үшін маңызды нәтиже береді. Сонымен қатар басқа параметрлер туралы деректерді нақты уақыт режимінде жіберуге мүмкіндік береді.

Бұл мақалада ҰҰА мен телеметрия жүйесін пайдалануға баса назар аударып, дала өрттерімен күресте оптикалық және жылу модельдерінің интеграциясы қарастырылған. Өрттің пайда болуы мен таралуы кезінде болатын негізгі физикалық процестерді талдаудан бастаймыз. Өрі қарай оптикалық және жылу сипаттамаларын есептеу әдістемесі, сондай-ақ оларды орман өрттерін бақылау үшін қолдану қарастырылады. Қорытындылай келе, ұсынылған модельдердің тиімділігін бағалау және оларды табиғи ресурстарды басқарудың қолданыстағы жүйелері шеңберінде практикалық қолдану ұсынылады. Оған арнайы ЭЕМ арналған компьютерлік бағдарлама көмегімен дала өрттерін анықтаудың физикалық әдістерін пайдалана отырып жылу түсіргіштерді және телеметриялық жүйелермен ұшқышсыз ұшу аппараттарында қолдануды зерттейміз [5].

Бұл зерттеуде қазіргі заманғы технологиялардың орман өрттерімен күресудің тиімділігін арттыруға, олардың пайда болуы мен дамуының болжайтын және нақты уақыт оқиғасын тікелей бақылауға, сондай-ақ экожүйеге де, адамзатқа да зиянды азайтуға қарастырылған.

ӘДІСТЕМЕ

Бұл мақалада орман өрттерін ерте анықтау мен олармен күресуге арналған оптикалық және жылу модельдерін, сондай-ақ ұшқышсыз ұшу аппараттары (ҰҰА) мен телеметрия технологияларын біріктіру қарастырылған. Дала өрттерінің себептері найзағайдың әсерінен, адам әрекеттерінен, туризмнің ықпалынан және оттың жақын маңдағы елді мекендерден таралуынан болуы мүмкін. Экожүйеде артық қоқыстарды немесе жапырақтарды жағу кезінде өрттің бақылаусыз қалуы да табиғи қауіптің бір түрі ретінде көрініс табады [6].

Зерттеудің әдістемелік негізін түсіндіру үшін физикалық терминдер мен қолданылатын технологиялық шешімдерге және олардың қолдану аймақтарына шолу берілген.

1. *Оптикалық модельдер* – жарықтың, әсіресе көрінетін және инфрақызыл диапазондардың, атмосфералық заттармен өзара әрекеттесуін сипаттайды. Дала өрттері жағдайында бұл модельдер жер бетіндегі жарықтың шағылысуы мен сіңірілуін талдап, өсімдіктердің күйін бағалауға және өрт қаупін болжауға мүмкіндік береді. ҰҰА-ға осы модельдерді біріктіру арқылы жерді қашықтан үздіксіз бақылау қамтамасыз етіледі.

2. *Жылу модельдері* – жылу алмасу және сәулеленудің физикалық принциптеріне негізделеді. Бұл модельдер ормандардағы жылу ағындарын бағалап, өрт ошақтарын ерте кезеңде анықтауға көмектеседі. Жылу сәулеленуін есептеу үшін Стефан-Больцман заңы қолданылады.

3. *Ұшқышсыз ұшу аппараттары (ҰҰА)* – орманды алқаптарды бақылау және деректер жинау үшін арнайы сенсорлармен жабдықталған құрылғылар. Термиялық және оптикалық сенсорлары бар ҰҰА орманның үлкен аумақтарын үздіксіз бақылап, қауіпке жедел жауап беруді қамтамасыз етеді.

4. *Телеметрия* – нақты уақыт режимінде қоршаған орта параметрлерін өлшеу және деректерді беру технологиясы. Телеметрия температура, ылғалдылық, жел туралы мәліметтерді және ҰҰА-дағы сенсорлардан жиналған ақпаратты жедел жеткізеді.

5. *Датчиктер мен сенсорлар* – қоршаған орта параметрлерін қабылдауға арналған құралдар. Орман өрттері жағдайында ыстық нүктелерді анықтауға арналған жылу камералары, өсімдік күйін бағалайтын оптикалық сенсорлар және ауа-райы жағдайын анықтайтын метеодатчиктер қолданылады.

6. *Геоақпараттық жүйелер (ГАЖ)* – кеңістіктік деректерді басқару, талдау және визуализациялау үшін қолданылады. ГАЖ қауіпті аймақтарды картаға түсіріп, өрттің таралуын бейнелеп, сөндіру операцияларының тиімділігін арттыруға мүмкіндік береді.

Орман өрттерін бақылау, анықтау және басқару тиімділігін арттыруда осы технологиялардың интеграциясы маңызды рөл атқарады. Аталған әдістердің үйлесімді түрде қолданылуы экожүйелер мен

адамдар қауымдастығына қауіпсіз жағдай туғызуға көмектеседі.



4 сурет. Дала өрттерін бақылауға арналған заманауи ұшқышсыз ұшу аппараттарының көрінісі

Ұшқышсыз ұшу аппараттарының жіктелуі. Ұшқышсыз ұшу аппараттарын (ұшқышсыз ұшу аппараттары) әртүрлі критерийлер бойынша жіктеуге болады, соның ішінде дизайны, мақсаты, басқару әдісі және ұшу биіктігінің ауқымы. Төменде ұшқышсыз ұшу аппараттарының негізгі санаттары берілген [7]:

Дизайн бойынша:

– *квадрокоптерлер*: ұшу кезінде жоғары маневрлік және тұрақтылықпен сипатталатын төрт роторы бар аппараттар. Олар тікелей визуалды бақылауды қажет ететін тапсырмаларды орындау үшін өте қолайлы.

– *мультикоптерлер*: төртеуден көп ұшқышсыз ұшу аппараттары. Бұл құрылғылар жүк көтергіштігін арттырады және оларды жабдықтар мен материалдарды жеткізу үшін пайдалануға болады.

– *ұшақтар*: бекітілген қанаттары бар ұшақтар. Олар қысқа уақыт ішінде үлкен аумақтарды қамтуға мүмкіндік береді және әдетте жоғары диапазонға ие.

– *гибридті жүйелер*: квадрокоптерлер сияқты тігінен ұшып, қонып, ұшақтар сияқты көлденең ұшуды жүзеге асыра алатын біріктірілген ұшқышсыз ұшу аппараттары. Бұл олардың әртүрлі операциялардағы мүмкіндіктерін кеңейтеді.

Мақсаты бойынша:

– *бақылау*: қоршаған ортаның жай-күйі туралы деректерді визуалды бақылау және жинау үшін қолданылады.

– *көлік*: жету қиын жерлерге керек-жарақтарды, жабдықтарды немесе материалдарды жеткізу үшін қолданылады.

– *аналитикалық*: температура, түгін және өрт қаупі талдауға қажетті басқа параметрлер туралы деректерді жинауға арналған сенсорлармен жабдықталған.

Басқару әдісі бойынша:

– *автономды ұшқышсыз ұшу аппараттары*: GPS және басқа навигациялық жүйелерді қолдана отырып, оператордың араласуынсыз тапсырмаларды орындай алатын бағдарламаланатын құрылғылар.

– *басқарылатын ұшқышсыз ұшу аппараттары*: оператордың үнемі басқаруын қажет ететін құрылғылар, бұл аппаратқа дәлірек және күрделі маневрлер жасауға мүмкіндік береді.

Ұшу биіктігінің диапазоны бойынша:

– *төмен деңгейлі ұшқышсыз ұшу аппараттары*: 1000 метрге дейін жұмыс істейді. Жеке аймақтарды егжей-тегжейлі бақылау және тексеру үшін өте қолайлы.

– *жоғары деңгейлі ұшқышсыз ұшу аппараттары*: 1000 метрден астам биіктікте жұмыс істей алады және кең ауқымды бақылау үшін қолданылады.

Ұшқышсыз ұшу аппараттарының сипаттамалары. Өртке қарсы күресте оларды пайдалану үшін маңызды ұшқышсыз ұшу аппараттарының негізгі сипаттамаларына мыналар жатады:

– *жүк көтергіштігі*: бақылау және талдау үшін қажетті сенсорларды, камераларды және басқа жабдықтарды тасымалдау мүмкіндігі.

– *ұшу уақыты*: ҰҰА тапсырмаларды орындай алатын ұзақтығы, бұл уақтылы талдау жүргізу үшін өте маңызды.

– *жылдамдық пен маневр*: ұшудың жоғары жылдамдығы және маневр жасау мүмкіндігі жағдайдың өзгеруіне жедел жауап беруге мүмкіндік береді.

– *сенсорлардың болуы*: ҰҰА әртүрлі деректерді жинауға мүмкіндік беретін жылу және оптикалық камералармен, метеорологиялық датчиктермен және басқа құрылғылармен жабдықталуы мүмкін.

– *навигация жүйесі*: GPS және басқа жүйелерге негізделген автономды ұшу мүмкіндігі, бұл операциялардың дәлдігі мен тиімділігін арттырады.

Дала өртіне қарсы күресте ұшқышсыз ұшуды қолданудың артықшылықтары. Дала өртіне қарсы күресте ұшқышсыз ұшу аппараттарын пайдалану бірқатар маңызды артықшылықтар береді. Тиімділік: ұшқышсыз ұшу аппараттарын қысқа мерзімде орналастыруға және іске қосуға болады, бұл ықтимал қауіптерге жылдам жауап беруге және нақты уақыт режимінде бақылауға мүмкіндік береді. Қол жеткізу қиын жерлерге қол жеткізу: ҰҰА дәстүрлі бақылау әдістері шектеулі болуы мүмкін шалғай және жету қиын аймақтарға ұшуға қабілетті. Нақты уақыттағы деректерді жинау: көптеген сенсорлармен жабдықталған ҰҰА температура, тұман деңгейі және басқа параметрлер туралы деректерді жібере алады, бұл өзекті ақпарат негізінде жедел шешім қабылдауға мүмкіндік береді. Адам өміріне қауіп-қатерді азайту: ұшқышсыз ұшу аппараттарын пайдалану қауіпті аймақтарда құтқарушылар мен өрт сөндірушілердің тікелей болу қажеттілігін азайтады, осылайша олардың денсаулығы мен өміріне қауіп төндіреді. Экономикалық тиімділік: ұшқышсыз ұшу операциясы әдетте тікұшақтарды немесе ұшақтарды пайдалану сияқты дәстүрлі дала өрттерін бақылау және сөндіру әдістерімен салыстырғанда аз ресурстар мен қаржылық шығындарды қажет етеді. Геоақпараттық жүйелермен уақыт режимінде жиналған деректерді беру арқылы ұшқышсыз ұшақтарды өрттің таралуын болжауға көмектесетін өзекті карталар мен модельдер жасау үшін ақпараттық жүйелерді біріктіруге болады. ҰҰА дала өрттерімен күресудің қуатты құралы болып табылады, бұл осы саладағы бақылау, талдау және шешім қабылдау тиімділігін айтарлықтай арттыруға мүмкіндік береді. Олардың көмегімен өрттің пайда болуына тезірек жауап беруге, болжауды жақсартуға және экожүйелер мен адамзат қауымдастығына зиянды азайтуға болады [8].

Жылу түсіргіштердің жұмыс принципі

Жылу көздерін анықтау үшін жылу түсіргіштер – тепловизорлар қолданылады. Жылу түсіргіштер-бұл инфрақызыл сәулеленуді әртүрлі аймақтардың температуралары ерекшеленетін кескінге айналдыру арқылы объектілер мен беттердің температурасының таралуын визуализациялауға мүмкіндік беретін құрылғылар. Бұл құрылғылар әртүрлі салаларда, соның ішінде медицинада, құрылыста, энергетикада және, әрине, дала өрттерімен күресуде кеңінен қолданылады. Жылу көздерін анықтау контекстінде олардың жұмыс принципі мен мүмкіндіктерін қарастырдық Жылу түсіргіштер инфрақызыл термография принципі негізінде жұмыс істейді. Температурасы абсолютті нөлден жоғары әрбір объект инфрақызыл сәуле шығарады. Бұл процесс объектінің температурасының жоғарылауымен күшейеді. Тепловизор осы инфрақызыл сәулеленуді қабылдайтын және оны электрлік сигналдарға айналдыратын арнайы сенсорларды пайдаланады.

Инфрақызыл сәулеленуді анықтау: жылу түсіргіштің ішінде құрылғының көру аймағындағы объек-

тілерден шығатын жылу сәулеленуін түсіретін детектор орнатылған. Детекторлар әр түрлі болуы мүмкін, соның ішінде пирометрлер, болометрлер және матрицалық детекторлар (мысалы, амидті матрицалар).

Сигналды түрлендіру: жиналған инфрақызыл деректер электрлік сигналдарға айналады. Содан кейін бұл сигналдар жылу кескінін қалыптастыру үшін арнайы процессормен өңделеді.

Жылу кескінін жасау: өңдеуден кейін деректер әртүрлі түстер басқа температура деңгейлеріне сәйкес келетін жылу картасы ретінде көрсетіледі. Әдетте жылы жерлер ашық түстермен (мысалы, қызыл немесе сары), ал салқын жерлер қою түстермен (мысалы, көк немесе қара) бейнеленген.

Калибрлеу және талдау: өлшеу дәлдігін жақсарту үшін жылу түсіргіштерді белгілі температура стандарттарын қолдана отырып калибрлеуге болады. Бұл жылу ауытқуларын анықтау және талдау сапасын жақсартуға мүмкіндік береді [9].

Жылу көздерін анықтауда жылу түсіргіштер дала өрттерімен күресуде, әсіресе жылу көздері мен ыстық нүктелерді анықтауда маңызды рөл атқарады. Олардың мүмкіншіліктері:

– *өрт ошақтарын ерте анықтау:* жылу түсіргіштер температураның шамалы өзгеруін түсіреді, бұл жалын әлі көрінбесе де, өрттің бастапқы кезеңдерін анықтауға мүмкіндік береді. Бұл кең ауқымды өрттердің алдын алудың шешуші факторы болуы мүмкін.

– *өрттің таралуын бақылау:* орман өртінің таралу процесінде жылу түсіргіштер өрттің таралу қарқындылығы мен бағытын жедел бағалауға мүмкіндік бере отырып, әртүрлі учаскелердің жай-күйін тұрақты бақылауды қамтамасыз етеді.

– *ыстық баспаналарды анықтау:* жылу түсіргіштер өрт кезінде адамдар мен жануарларға қауіп төндіретін ыстық баспаналарды анықтауға мүмкіндік береді. Бұл іздеу-құтқару жұмыстары үшін өте маңызды, өйткені олар дереу эвакуациялауды қажет ететін жерлерді анықтауға көмектеседі.

– *өсімдік жамылғысының температурасын талдау:* жылу түсіргіштерді өсімдік жағдайын бағалау, өрт қаупі жоғары кептірілген немесе зақымдалған жерлерді анықтау үшін пайдалануға болады.

– *сөндіруден кейінгі бақылау:* өртті сөндіру процесі аяқталғаннан кейін, жылу түсіргіштер өрттің қайта өртенуіне жол бермей, өрт сөндірушілер мен зерттеушілер үшін қауіпсіздікті қамтамасыз ете отырып, ыстық аймақтарды бақылауға көмектеседі.

Жылу түсіргіштер орман өрттерін бақылауда жылу көздерін анықтауға арналған жоғары тиімді құралдар болып табылады. Олардың өрттің алғашқы кезеңдерінде де температураны түсіру қабілеті, сондай-ақ жергілікті жердің жағдайын үнемі бақылауды қамтамасыз ету қабілеті оларды төтенше жағдайлардың алдын алу және әрекет ету жүйесінде таптырмас құралы болып табылады. Қазіргі жағдайда, дала

өрттері жиі және қарқынды бола бастаған кезде, жылу түсіргіштерді қолдану экожүйелерді қорғау және адамдардың қауіпсіздігін қамтамасыз ету үшін маңызды қадам болып табылады [10].

Оптикалық модельдер: жарықтың әртүрлі материалдармен және беттермен өзара әрекеттесуінің математикалық және физикалық сипаттамалары. Жарықтың мінез-құлқын және оның объектілермен әрекеттесудегі өзгерістерін болжау үшін қолданылады.

Оптика негіздері: физиканың жарықты және оның қасиеттерін, соның ішінде таралуын, сынуын, шағылысуын және шашырауын зерттейтін саласы. Рефлексия Заңы және сыну заңы сияқты Оптиканың негізгі заңдары жарық сәулелерінің беттермен әрекеттесу кезінде өзін қалай ұстайтынын сипаттайды.

Жарық сәулеленуі: денелер электромагниттік толқындар түрінде шығаратын Энергия. Көрінетін жарық-бұл адамның көзі қабылдайтын спектрдің бөлігі, бірақ оптикадағы әртүрлі қосымшалар үшін маңызды инфрақызыл және ультракүлгін сәулелер де бар.

Жарықтың шағылысуы және шашырау принциптері: Рефлексия: жарық сәулелері бетінен оралатын Процесс. Шағылысу Заңы шағылысу бұрышы түсу бұрышына тең екенін айтады.

Шашырау кезінде жарық қоршаған ортаның бөлшектеріне немесе гетерогенділігіне таралатын Процесс. Шашырау таяз (мысалы, ауа молекулаларында) немесе үлкен (мысалы, жаңбыр тамшыларында) болуы мүмкін.

Атмосфералық жағдайлардың оптикалық бақылауларға әсері: ауа райы жағдайлары (жылу дәрежесі, ылғалдылық, бұлттылық, ауаның ластануы) оптикалық бақылаулардың сапасына айтарлықтай әсер етуі мүмкін. Тұман мен түтін сияқты факторлар оптикалық өлшеулердің көрінуі мен дәлдігін төмендетіп, жарықты әлсіретуі немесе таратуы мүмкін.

Бұл ұғымдар оптикалық модельдерді түсінуге және оларды әртүрлі физикалық құбылыстарды, соның ішінде орман өрттерін бақылауды және басқа да экологиялық міндеттерді зерттеуде қолдануға негіз болады.

Жылуды модельдеу ауадағы және жер бетіндегі жылудың динамикасы мен таралуын сипаттайтын математикалық және физикалық модельдерді құру процесі. Бұл жылу көздерін модельдеуді және олардың қоршаған ортаға әсерін қамтиды. Жылу модельдері жердегі температура мен жылудың таралуын бағалау үшін қолданылатын құралдар. Бұл тәулік уақыты, атмосфералық жағдайлар және жер бедері модельдері жылудың көздерден қалай таралатынын және оның қалай өзгеретінін болжауға мүмкіндік береді.

Жылу деректерін өңдеу әдістері көмегімен алынған деректерді талдау және түсіндіру әдістері. Бұл дәл жылу карталары мен визуализацияларды жасау үшін ҰҒА-нан алынған деректерді іріктеу, калибрлеуді және біріктіруді қамтиды. Температура мен

жылудың таралуын бағалауда дала өрттерінің өсуі мен таралуын бақылау, өрт қаупін бағалау және сөндіруді жоспарлау үшін өте маңызды болып табылатын әр түрлі аймақтардағы температураның өзгеруін болжау үшін жылу модельдерін қолдану [7].

ҰҰА пайдалану арқылы температура ауытқулары мен жердегі ыстық нүктелер туралы деректерді жинау үшін жылу камераларымен жабдықталған ұшқышсыз ұшу аппараттары. ҰҰА үлкен аумақтарды тез және тиімді бақылауға және ақпаратты жедел алуға мүмкіндік береді. Бұл ұғымдар жылуды модельдеуде және олардың таралуында қолданылатын әдістер мен технологияларды түсінуге негіз болып табылады, бұл табиғи ресурстарды тиімді басқару және орман өрттерінен болатын зиянды азайту үшін өте маңызды.

Жылу модельдеуде белгілі бір аумақта температура мен жылудың таралуын болжау үшін қолданылатын математикалық және компьютерлік жүйелер. Олар жылудың әртүрлі көздерден қалай таралатынын және қоршаған ортаға қалай әсер ететінін түсінуге көмектеседі.

Температураны бағалауда жылу модельдерін қолдана отырып, жердің әр түрлі аймақтарының жылу көрсеткіштерін анықтау процесі. Бұл орман өрттері сияқты экологиялық өзгерістерді бақылау және табиғи ресурстарды басқару үшін маңызды.

Жылудың таралуда Күн радиациясы, ылғалдылық және рельеф сияқты факторларға байланысты температураның әртүрлі аймақтарда қалай өзгертетінін талдау. Жылудың таралуын түсіну жерді зерттеу және қоршаған ортаны қорғау саласындағы жоспарлау мен шешім қабылдауға көмектеседі.

Жылу деректерін өңдеу әдістері қолдануда жылу түсіргіштер мен ұшқышсыз ұшу аппараттарының көмегімен жиналған деректерді талдауға арналған әртүрлі әдістер мен алгоритмдер. Бұған дәл және ақпараттық жылу карталарын алуға мүмкіндік беретін сүзу, кескінді өңдеу және статистикалық талдау кіреді.

Ауадан жылу деректерін жинау үшін ұшқышсыз ұшу аппараттарын қолдану. ҰҰА үлкен аумақтардағы температура ауытқулары туралы жедел ақпарат жинауды қамтамасыз етеді, бұл өрт сияқты қауіптерді бақылау және тану тиімділігін айтарлықтай арттырады.

Бұл ұғымдар экологиялық зерттеулер мен табиғи ресурстарды басқаруда шешуші рөл атқаратын жылу модельдері мен деректерді өңдеу әдістерін қолдануды түсінуге негіз болады. Технологияны біріктіруде деректерді жинау мен талдауда тиімдірек нәтижелерге қол жеткізу үшін әртүрлі технологиялар мен құралдарды біріктіру процесі. ҰҰА мен жылу түсіргіштер контекстінде бұл ақпараттың кең ауқымын қамтуға мүмкіндік береді [3].

ҰҰА мен жылу түсіргіштер сияқты әртүрлі көздерден алынған ақпаратты біріктірдік. Бұл талданатын объектілердің немесе аумақтардың толық және

дәл карталарын жасауға көмектеседі. Деректерді жинау процестеріде әртүрлі сенсорлардан ақпарат алу үшін қолданылатын әдістер мен технологиялар. Бұған автоматтандырылған спутниктік бақылаулар, ұшқышсыз ұшу аппараттары, температура мен визуалды деректерді алу үшін стационарлық және мобильді сенсорларды пайдалану кіруі мүмкін. Деректерді талдауда үлгілер мен тенденцияларды анықтау мақсатында жиналған ақпаратты өңдеу және түсіндіру. Бұл процесс статистикалық талдауды, машиналық оқытуды және негізделген шешімдер қабылдау үшін деректерді визуализациялауды қамтуы мүмкін.

Телеметрия жүйелерінің өзара әрекеттесуіде нақты уақыттағы ұшқышсыз ұшу аппараттарының сенсорларынан деректерді беруді және өңдеуді қамтамасыз ететін технологиялар кешені. Бұл ұшу параметрлерін және жиналған деректердің сапасын тиімді бақылауға, сондай-ақ жағдайды жедел талдауға мүмкіндік береді. Бұл ұғымдар қоршаған ортаны бақылауда және басқа салаларда дәлдік пен жеделдікті айтарлықтай арттыратын ҰҰА мен жылу бейнелеу құрылғыларынан деректерді талдауға технологияларды біріктірудің маңыздылығын түсінуге негіз құрайды.

ҰҰА мен телеметрияның интеграциясы: ұшқышсыз ұшу аппараттарының (ұшқышсыз ұшу аппараттарының) мүмкіндіктерін орман өрттерін бақылау және басқару үшін телеметрия жүйелерімен біріктіру. Бұл нақты уақыттағы деректерді алуға мүмкіндік береді және үйлестіруді жақсартады.

Өрт қаупі бар аумақтарды бақылау үшін ұшқышсыз ұшу аппараттарын пайдалану. Ұшқышсыз ұшу аппараттарындағы жылу түсіргіштер ыстық нүктелерді анықтауға көмектеседі, бұл өрттің бастапқы кезеңіне тез жауап беруге мүмкіндік береді.

Ерте ескерту жүйелерін ескере отырып өрттің пайда болуы туралы шұғыл қызметтерді хабардар ететін жүйелерді құру үшін ҰҰА мен телеметрия деректерінің тіркесімі. Бұл жауап беру жылдамдығын арттырады және шешім қабылдау уақытын қысқартады. Сондай-ақ экожүйеге беріп жатқан зиянды бағалауда дала өрттерінің салдары туралы деректерді жинау және зақымдануды бағалау үшін ұшқышсыз ұшу аппараттарын қолдану. Бұл процесс қалпына келтіру жұмыстарын тиімді жоспарлауға және өрттен кейін экожүйенің күйін бақылауға мүмкіндік береді. ҰҰА мен телеметриядан алынған ақпарат негізінде әртүрлі қызметтер мен дала өрттерімен күресетін ұйымдар арасындағы өзара әрекеттесуді жақсарту. Бұл ресурстарды оңтайландыруға және сөндірудің тиімділігін арттыруға мүмкіндік береді. Бұл ұғымдар орман өртіне қарсы технологияны біріктірудің тиімділігін көрсетеді және экожүйе мен инфрақұрылымға зиянды азайту үшін жедел әрекет ету мен үйлестірудің маңыздылығын көрсетеді.

ҰҰА пайдалана отырып, дала өрттерін анықтау және бақылау контекстінде пайдаланылуы мүмкін жылу моделін жасау үшін - жылу алмасуды модельдеуге негізделген қарапайым тәсілді қолданамыз.

Опциялардың бірі - Стефан-Больцман заңын объектіден жылу шығаруды бағалау үшін қолдану. Объектінің беттің бірлік ауданынан енінің жиілік интервалындағы сәулеленудің қуаты

$$R_{\nu,T} = \frac{dW_{\nu_1\nu+dv}^{cay.}}{d\nu} \quad (1)$$

$dW_{\nu_1\nu+dv}^{cay}$ мұндағы – электромагниттік сәулеленудің энергиясы, ол бірлік уақытта объектінің бетінің бірлік ауданынан ν ден $\nu + d\nu$ -ге дейінгі жиілік интервалында шығарылады. Сәулеленудің өлшем бірлігі, Дж/(м²·с).

Денелердің оларға түскен сәулелерді жұтуы жұту қабілетімен сипатталады:

$$A_{\nu,T} = \frac{dW_{\nu_1\nu+dv}^{жyту.}}{dW_{\nu_1\nu+dv}} \quad (2)$$

Ол бірлік уақытта объектінің бетінің бірлік ауданынан бірлік жиілік интервалында өтетін, денеге түскен электромагниттік толқындар таситын $dW_{\nu_1\nu+dv}^{жyту.}$ жұтылатын $dW_{\nu_1\nu+dv}$ энергия бөлігін көрсетеді. Осы заңдылықты пайдалана отырып төмендегі алгоритмді қолдана отырып ЭЕМ арналған компьютерлік бағдарлама көмегімен дала өрттерін анықтаудың физикалық әдістерін пайдалана отырып жылу түсіргіштермен және телеметриялық жүйелермен үшқышсыз ұшу аппараттарында қолдануды зерттейміз.

Бағдарламада Стефан-Больцман заңын қолдана отырып, объектіден жылу сәулеленуін есептейтін calculate_thermal_radiation функциясы жүзеге асырылады. Берілген бастапқы параметрлер: температура, эмиссивтілік және бетінің ауданы. Нәтижелер жылу ағыны үшін және қажет болған жағдайда берілген қашықтықта алынған ағын үшін шығарылады.

Бұл бағдарлама күрделі физикалық әсерлерді қоса алғанда немесе қоршаған орта мен атмосфералық жағдайлардың әсері сияқты қосымша параметрлерді қосу арқылы одан әрі дамытуға болатын негізгі модель болып табылады.

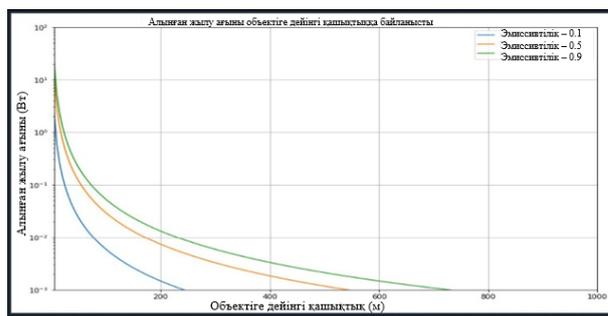
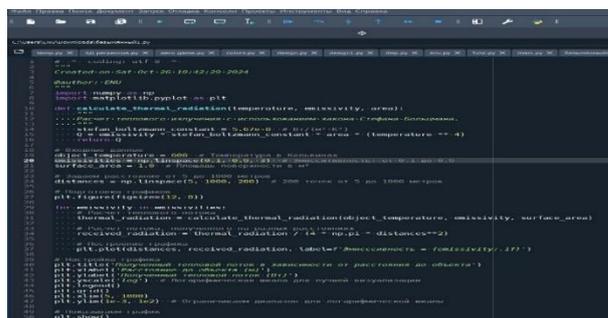
Нысан ретінде дала өрті зерттелді. Жылу сәулеленуінің нәтижелерін әр түрлі қашықтықта және әр түрлі түтін коэффициенттерімен графикалық бейнелеу үшін арнайы Python-да Matplotlib кітапханасын қолдана аламыз. Бұл мысалда түтін коэффициентінің әртүрлі мәндерінде объектіден қашықтық 5-тен 1000 метрге дейін ұлғайған кезде алынған жылу ағынының (рентген) қалай өзгеретінін көрсететін графиктер жасай аламыз.

Негізгі алгоритм моделін ескере отырып арнайы тапсырма ретінде 5-тен 1000 метрге дейінгі қашықтықты және 0,1-ден 0,9-ға дейінгі үш түтін коэффициентін өзгерту үшін нәтижелердің графикалық визуализациясы жасалынды және бағдарламалық код алынды.

Арнайы кітапханаларды қосу NumPy және Matplotlib кітапханалары негізінде іске асырылады:

Бағдарлама кодының үзіндісі:

```
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt
def calculate_thermal_radiation(temperature, emissivity, area):
    """
    Стефан-Больцман заңын қолдана отырып, жылу сәулеленуін есептеу.
    """
    stefan_boltzmann_constant = 5.67 e-8 # Вт/(м²·Дейін⁴)
    Q = emissivity * stefan_boltzmann_constant * area *
    (temperature ** 4)
    return Q
# Kipic параметрлері
object_temperature = 600 # Кельвиндегі Температура
emissivities = np.linspace(0.1, 0.9, 3) # Эмиссивтілік: 0.1-ден
0.9-ға дейін
surface_area = 1.0 # бетінің ауданы м²
# 5-тен 1000 метрге дейінгі қашықтықты орнатыңыз
distances = np.linspace(5, 1000, 200) # 200 нүкте 5-тен 1000
метрге дейін
# Кестелерді дайындау
plt.figure(figsize=(12, 8))
for emissivity in emissivities:
    # Жылу ағынын есептеу
    thermal_radiation =
    calculate_thermal_radiation(object_temperature, emissivity,
    surface_area)
    # Әр түрлі қашықтықта алынған ағынды есептеу 0,1 ден 0,9
    received_radiation = thermal_radiation / (4 * np.pi *
    distances**2)
    # График құру
    plt.plot(қашықтықтар, received_radiation, label=F ' Эмиссив-
    тілік = {эмиссивтілік:1f}')
    # Графикті орнату
    plt.тaқырып ('нысанға дейінгі қашықтыққа байланысты алынған жылу
    ағыны')
    plt.xlabel ('объектіге дейінгі қашықтық (м)')
    plt.ylabel ('алынған жылу ағыны (Вт)')
    plt.yscale ('log') # жақсы визуализация үшін логарифмдік шкала
    plt.legend()
    plt.grid()
    plt.xlim(5, 1000)
    plt.ylim(1e-3, 1e2) # логарифмдік шкала үшін диапазонды шек-
    теніз
    # Кестені көрсету
    plt.show()
```



5 сурет. Қашықтығы 5-тен 1000 метрге дейінгі өрт аймағының бетіндегі қашықтықтан анықтаудағы эмиссивтілік: 0,1-ден 0,9-ға дейін біркелжі бөлінген үш эмиссивтілік мәнінің бағдарламасы мен нәтижесі

Осы бағдарламаны іске қосқаннан кейін алынған жылу ағынының өрт болып жатқан объектіге дейінгі қашықтыққа қарай ҰҰА (телеметрия құрылғысы тіркелген) қалай төмендейтінін көрсететін әр түрлі

эмиссия коэффициенттері үшін сызықтарды көрсететін графигі алынды. Бұл әртүрлі жағдайларда жылу өнімділігін талдау үшін пайдалануға болады.

НӘТИЖЕЛЕР МЕН ТАЛҚЫЛАУЛАР

Зерттеу нәтижесінде Python бағдарламасы арқылы орман өрттерімен күресу үшін жылу және оптикалық модельдердің тиімділігі талданды. Бағдарлама негізінде жылу сәулеленуін есептеудің негізгі кезеңдері мен параметрлері анықталып, олардың қашықтық пен эмиссивтілік мәндеріне тәуелділігі зерделенді. Жылу ағынын есептеу нәтижелері жылу сәулеленуінің қашықтықтың ұлғаюына байланысты төмендейтінін көрсетті, бұл өрттің ықпал ету аймағын дәл бағалауға маңызды негіз болады.

Жылу түсіргіштермен жабықталған ұшқышсыз ұшу аппараттарын (ҰҰА) қолдану температура, ылғалдылық және зиянды түтіндер деңгейі туралы жедел ақпарат алуға мүмкіндік береді. Инфрақызыл сәулеленуді тепловизор арқылы бейнелеу ыстық нүктелерді тиімді анықтауға, ал модельдер орман өртінің шекарасын дәл белгілеуге және қарқындылығын бағалауға көмектеседі. Бұл тәсіл өрттің алдын алу мен сөндіру шараларын жоспарлауды тиімдірек етеді.

Жылу және оптикалық технологияларды біріктіру экожүйелік және экономикалық шығындарды азайтып, табиғи апаттардың болжамдылығын арттырады, сондай-ақ тәуекелдерді басқаруды жетілдіреді. Осылайша, зерттеу орманды қорғаудың заманауи және тиімді әдістерін қолдануға мүмкіндік беріп, экожүйені сақтау мен дала өрттерінің алдын алу саласында елеулі үлес қосады [11].

Бұл зерттеуде өрт ошақтарын ерте анықтау және оның таралуын болжау үшін қолданылған әдістердің тиімділігі бағаланды. Жинақталған мәліметтер негізінде бірнеше негізгі нәтижелер алынды.

ҚОРЫТЫНДЫ

Қорытындылай келе, ұшқышсыз ұшу аппараттары мен телеметрия жүйелерін қолдана отырып, оптикалық және жылу модельдерін біріктіру дала өрттеріне қарсы күресте шешуші рөл атқарады. Мақалада орман өрттерін бақылау мен олардың алдын алу мақсатында Стефан-Больцман заңына негізделген жылу сәулеленуін есептеу әдісі көрсетілді, бұл орман өрттерінің туындау қаупін дәл анықтауға мүмкіндік береді. Жылу камералары мен телеметриялық датчиктердің жұмысы тек жылу ағынын емес, сонымен қатар температура, ылғалдылық және оптикалық көріну туралы маңызды деректерді алуға көмектеседі, бұл өрт қаупін ертерек анықтауға және оны тиімді бақылауға жағдай жасайды. Мұндай мәліметтер, әсіресе, өрт кезінде анықталатын «ыстық нүктелерді» дәл локализациялау үшін өте маңызды, себебі дәл осы аймақтарда оттың таралу жылдамдығын бақылауға және оны тиімді шектеуге мүмкіндік туады.

Орман өрттерімен күресте қолданылатын оптикалық және жылу сипаттамаларын есептеу арқылы

әзірленген модельдер ҰҰА-ның табиғат қорғау қызметінде пайдаланудың тиімділігін көрсетеді. Python бағдарламасы арқылы жылу сәулеленуінің қашықтыққа және түтін коэффициентіне тәуелділігін есептеудің нәтижелері бұл технологияның орман өрттерінің өсу динамикасын болжау және олардың дамуын басқару үшін пайдалы екендігін дәлелдейді. ҰҰА-лар, сонымен қатар, қатты түтін немесе жоғары температуралы орта жағдайында да жұмыс істей алатындықтан, алдыңғы шептен түсірілім жасап, оттың орналасу аймағын дәл бақылау мүмкіндігін береді.

Талдау нәтижелері көрсеткендей, осы технологияларды тиімді қолдану арқылы тек экожүйелік шығындарды азайтып қана қоймай, адамдардың өмірін сақтап қалуға мүмкіндік туады. ҰҰА мен жылу бейнелеу технологиялары орман өрттері кезіндегі төтенше жағдайларды тиімді басқаруға және қажетті іс-шараларды уақытылы жүзеге асыруға жағдай жасайды. Бұл, өз кезегінде, табиғат пен қоғамға тигізетін әсерді азайтып, болашақта орман және дала өрттерін тиімді түрде алдын алу және оларға қарсы іс-қимыл шараларын жетілдіру үшін қажет технологиялық жетістіктердің бірі болып табылады.

Ризашылық, мүдделер қақтығысы

Бұл зерттеу Қазақстан Республикасы Ғылым және Жоғары Білім Министрлігінің Ғылым Комитеті тарапынан қаржыландырылды (Жоба ИРН № AP23486167). Авторлар осы мақалаға қатысты ешқандай мүдделер қақтығысы жоқ екенін мәлімдейді және зерттеу барысында көрсетілген қолдау мен ынтымақтастық үшін барлық әріптестер мен мекемелерге ризашылығын білдіреді.

ӘДЕБИЕТТЕР

1. J. A. Smith and L. B. Jones, Дала өрттерін басқарудағы қашықтықтан зондтау: қолдану және жетістіктер // Экологиялық менеджмент журналы. – 2020. – Vol. 256. – Art. No. 109961. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.109961>
2. Kursiv Media, «Елімізде соңғы үш жылда 2251 орман өрті тіркелген». – 2023. <https://kz.kursiv.media/kk/2023-06-12/elimizde-songghy-uesh-zhylda-2251-orman-oerti-tirkegen/>
3. Makat Tynysy, «Дала өртінің алдын алу керек». – 2023. <https://maqat-tynysy.kz/zhanalyqtar/audan/dala-ortinin-alдын-алу-kerek.html>
4. Y. Zhang and H. Zhang, Орман өрттерін бақылау және басқару үшін ұшқышсыз ұшу аппараттарын пайдалану: Шолу // Халықаралық Қашықтықтан Зондтау Журналы. – 2019. – Vol. 40, No. 12. – P. 4694–4715. <https://doi.org/10.1080/01431161.2019.1589703>
5. Kazinform, «Қазақстанның қай өңірлерінде орман өрті жиі болады». – 2023. https://kaz.inform.kz/news/kazakstannyn-kay-onirlerinde-orman-orti-zhii-bolady_a4057729
6. H. Balzter and B. A., Өртті бағалау үшін оптикалық және термиялық қашықтықтан зондтау: әдістемелері мен қолданылуы // Қоршаған ортаны қашықтықтан

- зондтау. – 2021. – Vol. 255. – Art. No. 112278.
<https://doi.org/10.1016/j.rse.2021.112278>
7. F. N. Kogan, Дала өрттерін спутниктік бақылау: жаңа тәсіл // Жерді бақылау және қашықтықтан зондтауды қолдану. – 2019. – Vol. 48. – P. 145–152.
<https://doi.org/10.1016/j.eoear.2019.06.005>
 8. W. Liu and Z. Zhou, Өртті анықтау мен басқарудағы ұшқышсыз ұшу аппараттарының (ҰҰА) рөлі: Шолу // Өрт Технологиясы. – 2020. – Vol. 56, No. 3. – P. 971–992. <https://doi.org/10.1007/s10694-019-00941-6>
 9. C. Karki and T. Parker, Ұшқышсыз ұшу аппараттарындағы өртті анықтау үшін термиялық бейнелеуді интеграциялау // Жағдайлық зерттеу, Датчиктер. – 2021. – Vol. 21, No. 9. – Art. No. 3060. <https://doi.org/10.3390/s21093060>
 10. J. P. Boulanger and D. Fortin, Өрттің таралуын болжау: қазіргі әдістер мен технологияларға шолу // Орман экологиясы және басқару. – 2018. – Vol. 410. – P. 167–177, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2017.10.009>
 11. C. Chu and H. T., Орман өрттерін термиялық қашықтықтан зондтаудағы жетістіктер: технологиялар және қолдану // Халықаралық қолданбалы жерді бақылау және геоаппараттық журнал. – 2022. – Vol. 105. – Art. No. 102556. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2021.102556>
 3. Makat Tynsy, “Preventing grassland fires is necessary”. – 2023. <https://maqat-tynsy.kz/zhanalyqtar/audan/dala-ortinin-aldyn-alu-kerek.html>
 4. Y. Zhang and H. Zhang, Using unmanned aerial vehicles for forest fire monitoring and management: A review // International Journal of Remote Sensing. – 2019. – Vol. 40, No. 12. – P. 4694–4715. <https://doi.org/10.1080/01431161.2019.1589703>
 5. Kazinform, “In which regions of Kazakhstan are forest fires frequent”. – 2023. https://kaz.inform.kz/news/kazakstannyn-kay-onirlerinde-orman-orti-zhii-bolady_a4057729
 6. H. Balzter and B. A., Optical and thermal remote sensing for fire assessment: methodologies and applications // Remote Sensing of Environment. – 2021. – Vol. 255. – Art. No. 112278. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2021.112278>
 7. F. N. Kogan, Satellite monitoring of grassland fires: a new approach // Earth Observation and Remote Sensing Applications. – 2019. – Vol. 48. – P. 145–152, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.eoear.2019.06.005>
 8. W. Liu and Z. Zhou, The role of unmanned aerial vehicles (UAVs) in fire detection and management: A review // Fire Technology. – 2020. – Vol. 56, No. 3. – P. 971–992. <https://doi.org/10.1007/s10694-019-00941-6>
 9. C. Karki and T. Parker, Integrating thermal imaging for fire detection in unmanned aerial vehicles: A case study // Sensors. – 2021. – Vol. 21, No. 9. – Art. No. 3060. <https://doi.org/10.3390/s21093060>
 10. J. P. Boulanger and D. Fortin, Forecasting fire spread: A review of current methods and technologies // Forest Ecology and Management. – 2018. – Vol. 410. – P. 167–177. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2017.10.009>
 11. C. Chu and H. T., Advances in thermal remote sensing for forest fires: technologies and applications // International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation. – 2022. – Vol. 105. – Art. No. 102556. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2021.102556>

REFERENCES

ОПТИЧЕСКИЕ И ТЕПЛОВЫЕ МОДЕЛИ ПРОТИВ ЛЕСНЫХ ПОЖАРОВ: ИНТЕГРАЦИЯ БПЛА И ТЕЛЕМЕТРИИ

Х. Молдамұрат, Д. М. Калманова, О. К. Абдирашев*, Г. А. Ануар, А. Акан

Евразийский национальный университет им. Л.Н. Гумилева, Астана, Казахстан

* E-mail для контактов: abdirashev_ok@enu.kz

В данной статье рассмотрены актуальные проблемы лесных и степных пожаров в Республике Казахстан, их увеличение частоты, влияние на экосистемы и экономику, а также на безопасность человека. Обсуждается необходимость использования современных технологий в контроле и управлении пожарами, в том числе беспилотных летательных аппаратов (БПЛА). В компьютерном программировании математическая формула закона Стефана-Больцмана использовалась для моделирования теплового процесса как физического явления. В результате расчетов в программе Python была подтверждена зависимость теплового потока от расстояния и коэффициента дыма. В ходе исследования получены результаты расчета теплового излучения на основе методики оценки оптических и тепловых показателей для раннего предупреждения пожара. Было показано, что интеграция БПЛА и телеметрии улучшает контроль над пожарными условиями, повышает точность прогнозирования пожаров за счет оперативного получения информации в режиме реального времени. Этот подход предлагается как важный способ защиты экосистем и жизни людей.

Ключевые слова: лесные пожары, беспилотные летательные аппараты, геоинформационные системы, оптическое моделирование, тепловое моделирование, телеметрия, датчики и сенсоры.

**OPTICAL AND THERMAL MODELS AGAINST FOREST FIRES:
INTEGRATION OF UAVS AND TELEMETRY**

Kh. Moldamurat, D. M. Kalmanova, O. K. Abdirashev*, G. A. Anuar, A. Akan

L.N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, Kazakhstan

** E-mail for contacts: abdirashev_ok@enu.kz*

This article discusses the current problems of forest and steppe fires in the Republic of Kazakhstan, their increasing frequency, impact on ecosystems and the economy, as well as on human safety. The necessity of using modern technologies in fire control and management, including unmanned aerial vehicles (UAVs), is discussed. In computer programming, the mathematical formula of the Stefan-Boltzmann law was used to model a thermal process as a physical phenomenon. As a result of calculations in the Python program, the dependence of heat flow on distance and smoke coefficient was confirmed. In the course of the study, the results of calculating thermal radiation based on the methodology for evaluating optical and thermal indicators for early fire prevention were obtained. It has been shown that the integration of UAVs and telemetry improves control over fire conditions, increases the accuracy of fire forecasting by promptly obtaining information in real time. This approach is proposed as an important way to protect ecosystems and human life.

Keywords: *forest fires, unmanned aerial vehicles, geoinformation systems, optical modeling, thermal modeling, telemetry, sensors.*

<https://doi.org/10.52676/1729-7885-2025-1-38-45>

УДК 544.6.076.324.1

ИЗУЧЕНИЕ ВЛИЯНИЯ ВЫБОРА СВЯЗУЮЩЕГО МАТЕРИАЛА НА ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА АНОДОВ НА ОСНОВЕ LaNi_5

С. Д. Мәлік¹, С. К. Әбдімомын¹, М. К. Скаков², Е. Т. Коянбаев³, А. Ж. Миниязов³, Ф. И. Мальчик^{1*}

¹ *Казахский национальный университет им. аль-Фараби, Алматы, Казахстан*

² *РГП «Национальный ядерный центр Республики Казахстан», Курчатов, Казахстан*

³ *Филиал «Институт атомной энергии» РГП НЯЦ РК, Курчатов, Казахстан*

* E-mail для контактов: frodo-007@mail.ru

В условиях растущих требований к экологичности и эффективности систем хранения энергии никель-металлгидридные (Ni-MH) аккумуляторы продолжают привлекать внимание благодаря своей безопасности и доступности. Оптимизация компонентов таких аккумуляторов является приоритетной задачей для повышения их электрохимических характеристик и долговечности. Одним из ключевых компонентов являются аноды на основе гидрид образующего сплава, электрохимические свойства которых, такие как стабильность и ёмкость, в значительной мере зависят от выбора связующего материала, влияющего на структурную целостность, проводимость и устойчивость анода при циклическом заряде и разряде. В данной работе исследовано влияние различных полимерных связующих на электрохимические свойства анодов на основе LaNi_5 для Ni-MH аккумуляторов. Сплав LaNi_5 был синтезирован твердофазным методом из оксидов металлов, структура которого была подтверждена методом рентгенофазового анализа. Для исследования были изготовлены электроды с использованием трех типов связующих: политетрафторэтилена (PTFE), поливинилиденфторида (PVdF) и ультрадисперсного полиэтилена (PE). Электрохимические характеристики анодов изучались методами циклической вольтамперометрии и гальваностатического заряда-разряда. Результаты показали, что тип связующего существенно влияет на электропроводность, емкость и циклическую стабильность электродов. Аноды со связующим PTFE продемонстрировали наилучшие электрохимические характеристики с высокой удельной емкостью (~200 мА·ч/г) и стабильностью при многократном циклировании. Электроды с PE показали высокую начальную емкость, но быструю деградацию при циклировании, а аноды с PVdF характеризовались стабильной, но низкой емкостью. Исследование подтверждает, что выбор связующего материала имеет решающее значение для оптимизации производительности Ni-MH аккумуляторов.

Ключевые слова: никель-металлгидридные аккумуляторы, LaNi_5 , полимерные связующие, политетрафторэтилен, поливинилиденфторид, полиэтилен.

ВВЕДЕНИЕ

Современные тенденции в области энергетических технологий указывают на необходимость разработки новых эффективных, стабильных и экологически чистых систем хранения энергии. Одним из ключевых компонентов таких систем являются аккумуляторы, которым необходимо улучшение емкостных характеристик и стабильности при длительной эксплуатации. Никель-металлгидридные (Ni-MH) аккумуляторы, несмотря на жесткую конкуренцию со стороны литий-ионных аккумуляторов, остаются востребованными благодаря их высокой экологической безопасности, дешевизны (относительно литиевых батарей) и возможности более легкой переработки [1]. Это делает их привлекательными для широкого применения.

Ключевую роль в обеспечении долговечности и эффективности работы Ni-MH аккумуляторов играют анодные материалы, основу которых составляют бинарные сплавы с высокими водородопоглощающими свойствами. В частности, сплавы с кристаллическими структурами AB_2 , A_2B , AB_5 и AB (где элемент А представляет лантаноиды и щелочноземельные металлы, а элемент В – металлы d- и p-групп) находят

широкое применение благодаря своим уникальным водородоаккумулирующим свойствам [2]. Эти материалы обладают способностью эффективно поглощать и выделять водород, что делает их идеальными для использования в анодах Ni-MH аккумуляторов.

Анодные материалы для Ni-MH аккумуляторов должны отвечать строгим требованиям, так как их характеристики напрямую влияют на работоспособность устройства. Помимо высокой водородопоглощающей способности, материалы должны обладать быстрой кинетикой для эффективного образования и разложения гидридов, что особенно важно при работе на высоких токах заряда и разряда. Также требуется высокая механическая устойчивость к разрушению/деградации во время циклов заряда-разряда, коррозионная стойкость и хорошая электронная проводимость. Гидрофильность и развитая удельная поверхность, которые способствуют хорошей смачиваемости электролитом и обеспечивают доступ электролита ко всему объему материала, также являются немаловажными аспектами. Ключевым критерием для коммерческого использования таких материалов является их доступность, низкая цена и наименьшая токсичность/вредность [3].

Готовый анод для Ni-MH батареи является многокомпонентной системой, состоящей из подложки, самого активного материала, проводящего материала и связующего. Связующее оказывает значительное влияние на свойства электрода, такие как механическая прочность, адгезия к токоприёмнику, электропроводность, химическая стабильность по отношению к электролиту, а также себестоимость и экологическая безопасность [4]. Подбор и оптимизация связующих материалов становится ключевым шагом для повышения эффективности работы Ni-MH аккумуляторов.

Для предотвращения механической деструкции анодов в процессе абсорбции и десорбции водорода (заряда/разряда аккумулятора) используют различные типы связующих. Они помогают создать механически прочную структуру, способную выдерживать многократные циклы без потери эффективности. В качестве связующих применяются металлические порошки (чаще всего медь (Cu), реже никель (Ni), кобальт (Co), золото (Au) и платина (Pt)) и полимерные органические вещества, такие как политетрафторэтилен (PTFE), полиэтилен (PE), поливиниловый спирт (PVA), полистирол (PS), полиуретан, полиакриловая кислота (PAA) и силиконы. Эти компоненты могут использоваться как по отдельности, так и в различных комбинациях. Металлические связующие обычно составляют 60–80 масс.% от общей анодной массы, что приводит к увеличению массы электрода и снижению его удельной ёмкости. Кроме того, металлические порошки должны обладать высокой пластичностью и иметь размер частиц, в 2–3 раза меньше, чем размер рабочего материала, для обеспечения необходимой дисперсности. Также многократное циклирование увеличивает вероятность окисления металлических порошков, что может привести к разрушению электрода. В связи с этим применение металлических порошков в качестве связующего не всегда оправдано [5].

Полимерные связующие, составляющие 10–20 масс.% от состава электродного материала, обладают лучшими механическими и химическими характеристиками, что снижает риск разрушения электрода при многократных циклах и минимизирует вероятность окисления самого активного материала. Однако полимерные связующие являются диэлект-

риками и значительно понижают электронную проводимость электродной массы в отличие от порошков металлов в качестве связующих и в некоторых случаях способны блокировать поверхность, предотвращая ионный контакт [4]. Соответственно, количество и вид связующего должны быть четко подобраны и оптимизированы. Тем не менее полимеры более предпочтительны для создания долговечных и стабильных электродов. В таблице 1 приведены свойства полимерных связующих для электродных материалов.

Наиболее популярным полимерным связующим электродов является PVdF, благодаря высокой механической прочности и химической стабильности. Однако PVdF имеет ряд недостатков, связанных с малой экологичностью, наличием фторированных групп, применением токсичного и вредного растворителя N-метилпирролидона (NMP) [14]. Экологичной альтернативой PVdF может быть PTFE, так как он может быть диспергирован в воде и стабилизирован смачивающими веществами. Однако PTFE имеет схожие недостатки, связанные с наличием фторированных групп. Другие более экологически безвредные варианты связующих полимерных материалов считаются поливиниловый спирт и полиакриловая кислота [15]. Однако их применение вызывает опасения из-за малой механической прочности, химической и электрохимической стабильности [16]. Помимо этого, данные связующие гидрофильные, что может ускорить коррозию электродного материала.

Полиэтилен является интересной и перспективной альтернативой благодаря своей экологичности и отсутствию фторированных групп, что делает его более безопасным для окружающей среды [14]. Кроме того, PE обладает достаточной механической прочностью и хорошей гибкостью, что может снизить риск разрушения электрода при циклировании. PE гидрофобен, поэтому может способствовать более длительной эксплуатации электродов в условиях агрессивных сред [17]. Несмотря на это, PE остается мало изученным в контексте его применения в электрохимических системах, что открывает возможности для дальнейших исследований и улучшений его свойств для повышения эффективности и стабильности электродов.

Таблица 1. Свойства полимерных связующих, использующихся в качестве связующего [6–13]

Связующее	Экологичность используемых растворителей	Отсутствие -F групп	Механическая прочность	Химическая стабильность	Адгезия к электродным материалам
PVDF	-	-	высокая	высокая	средняя
PTFE	+	-	высокая	высокая	средняя
PVA	+	+	средняя	средняя	высокая
PAA	+	+	средняя	высокая	высокая
PE	+	+	средняя	средняя	-

В данной работе представлен и детально охарактеризован водородоаккумулирующий металлический сплав типа AB_5 с химической формулой LaNi_5 , который является перспективным материалом для использования в качестве анода никель-металлгидридных аккумуляторов. Новизна исследования заключается в сравнительном анализе влияния различных полимерных связующих материалов (PTFE, PVdF и PE) на электрохимические характеристики анодов, включая их емкость, циклическую стабильность и проводимость. В отличие от предыдущих работ, здесь подробно рассмотрены механизмы влияния связующего на структурную целостность, электропроводность и стабильность материала при циклическом заряде-разряде. Основная цель исследования направлена на разработку и получение новых композиционных материалов с улучшенными электрохимическими свойствами, которые обеспечат повышенную эффективность и долговечность Ni-MH аккумуляторов в реальных условиях эксплуатации. Полученные результаты позволяют обоснованно выбрать наиболее эффективное связующее для оптимизации характеристик никель-металлгидридных аккумуляторов.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Сплав, поглощающий водород (AB_5 -типа), синтезирован твёрдофазным методом из оксидов металлов NiO и La_2O_3 аналитической чистоты ($\geq 99,5\%$, Stanchem, Treibacher, Aldrich). На первом этапе из NiO и La_2O_3 был получен промежуточный продукт La_2NiO_4 путём спекания смеси в мольном соотношении 1:1 при 1000°C в течение 6 часов. Далее полученный La_2NiO_4 смешивали с NiO (в мольном соотношении 1:9) и гомогенизировали в планетарной мельнице. Полученный порошок соединяли с CaH_2 и LiCl (в массовом соотношении 1:2:0,9) и нагревали до 550°C в атмосфере Ag/H_2 (95:5) для восстановления. После завершения процесса восстановления образовавшийся оксид кальция (CaO) удаляли путем суспендирования полученного порошка в 4 М растворе хлорида аммония (NH_4Cl).

Для исследования структуры полученных соединений использовался метод рентгенофазовой дифракции (РФД) с длиной волны $\text{CuK}\alpha$ -излучения $1,5418 \text{ \AA}$ (Tongda TD-3700, Китай). Все измерения проводились в диапазоне углов $10\text{--}80^\circ$ (2θ). Для анализа морфологии частиц была использована сканирующая электронная микроскопия (Quanta 3D 200i Dual system, FEI, США). Электрохимические измерения проводились в конфигурации прижимной трехэлектродной ячейки (рисунок 1) при использовании потенциостата/гальваностата BioLogic-SP300 (BioLogic, Франция). Электрохимические свойства определяли методами циклической вольтамперометрии (CV) и гальваностатического заряда-разряда (CP). В качестве противоиэлектрода в трехэлектродной системе выступала углеродная ткань, а в качестве электрода сравнения – Hg/HgO (1 М KOH). Все измерения про-

водились при комнатных условиях в 6 М растворе KOH в качестве электролита и со скоростью сканирования 1 мВ/с (в гальваностатическом режиме 1С) в диапазоне потенциалов от $-0,4$ до $-1,2$ В (vs Hg/HgO). Электрическая проводимость электродов была измерена с помощью четырехточечного зондового электрода (Ossila, Нидерланды).

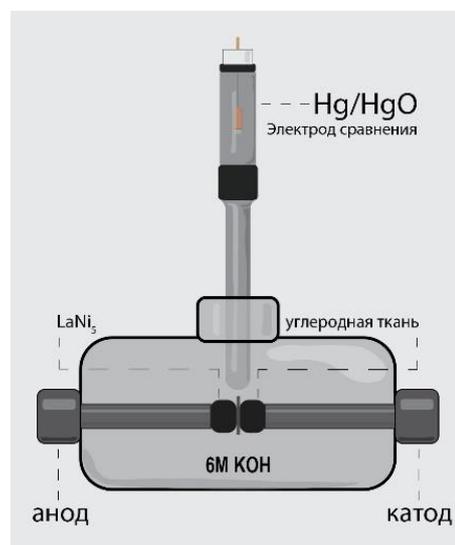


Рисунок 1. Схема лабораторной электрохимической ячейки для исследования анодного материала на основе синтезированного LaNi_5

Электроды на основе LaNi_5 были изготовлены с тремя различными связующими такими как: ультра высодисперсный полиэтилен, поливинилиденфторид растворенный в N-метилпирролидоне (NMP) и политетрафторэтилен 60% эмульсия. Подробный метод изготовления каждого электрода с применением различных связующих представлен ниже:

Приготовление электродов на основе связующего материала PVdF

В агатовую ступку объемом 300 мл насыпают 90 мг синтезированного материала (LaNi_5) и измельчают его пестиком в течение 10 минут. Затем добавляют 335 мкл 3%-го раствора PVdF, растворенного в N-метилпирролидоне, при массовом соотношении LaNi_5 :PVdF, равном 9:1. Смесь перемешивают несколько минут до образования вязкой пасты, которую наносят на графитовую фольгу с использованием вакуумного аппликатора с высотой зазора ракеля («doctor blade») 200 мкм. Пасту затем сушат в вакууме при 100°C в течение 12 часов. Для увеличения плотности и выравнивания толщины электродного материала его пропускают через вальцы. После этого электроды круглой формы диаметром 7 мм вырезают с помощью аппарата для вырезки.

Приготовление электродов на основе связующего материала PE

В агатовую ступку объемом 300 мл загружают 90 мг активного материала (LaNi_5) и 10 мг порошка ультрадисперсного полиэтилена высокого давления,

после чего смесь тщательно гомогенизируют в течение 10 минут (массовое соотношение LaNi_5 -PE 9:1). Затем 15 мг полученной смеси загружают в пресс-форму диаметром 8 мм и прессуют при давлении 150 бар.

Приготовление электродов на основе связующего материала PTFE

В агатовую ступку объемом 300 мл загружают 450 мг рабочего материала (LaNi_5) и 84 мг 60%-ной эмульсии политетрафторэтилена в воде при массовом соотношении LaNi_5 : PTFE, равном 9:1. Смесь тщательно перемешивают пестиком в течение нескольких минут, после чего по каплям добавляют изопропиловый спирт до получения тестообразной консистенции. Полученную электродную массу многократно вминают и раскатывают для равномерной гомогенизации компонентов. Затем массу прокатывают на вальцах до толщины плёнки около 10 мкм. Полученные электроды сушат на воздухе при комнатной температуре в течение 2–3 часов, а затем в вакуумном сушильном шкафу при 80 °C в течение 12 часов. После этого из полученного материала с помощью аппарата для вырезки формируют электроды круглой формы диаметром 7 мм.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЯ

Электрохимические характеристики, такие как ёмкость, циклическая стабильность и обратимость реакции представляют собой один из ключевых аспектов при разработке металлгидридных электродов, поскольку они оказывают непосредственное влияние на параметры и эффективность работы батарей. Прежде всего, одним из наиболее значимых показателей является ёмкость электрода, которая определяет количество абсорбированного водорода и, следовательно, количество энергии, которое может быть накоплено и высвобождено в ходе работы батареи. Следует отметить, что повышение ёмкости приводит к увеличению плотности энергии батареи, что является особенно важным для энергоёмких приложений, таких как электромобили и системы хранения энергии.

Таким образом, изучение и оптимизация таких параметров, как ёмкость и циклическая стабильность, являются критически важными для повышения эффективности, долговечности и мощности металлгидридных аккумуляторных систем.

Для подтверждения структуры полученного соединения был проведён рентгенофазовый анализ. На рисунке 2 представлена рентгенограмма LaNi_5 , синтезированного методом твердофазного спекания из оксидов. Полученные данные рентгеновской дифракции подтвердили, что синтезированный сплав LaNi_5 (типа AB_5) обладает гексагональной структурой типа CaCu_5 . Характерные пики на рентгенограмме соответствуют стандартным данным для структуры CaCu_5 , а уточнение по методу Ритвельда подтверждает его чистоту (полное отсутствие примесей) и успешное получение требуемой кристаллической фазы [18].

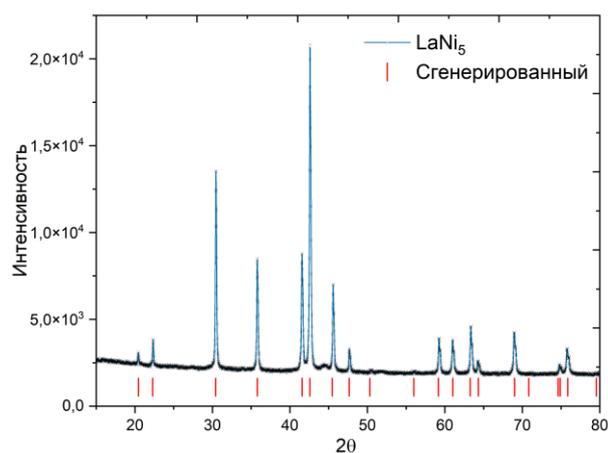


Рисунок 2. Дифрактограмма LaNi_5 , синтезированного методом твердофазного спекания из оксидов

Для анализа морфологии и размера частиц синтезированного материала были проведены исследования с использованием сканирующей электронной микроскопии (СЭМ). На рисунке 3 видны наноструктурированные частицы, сгруппированные в крупные агломераты размером до нескольких микрометров. Индивидуальные частицы различаются по размеру, формируя сложные бесструктурные формирования LaNi_5 . Измерения показывают, что размер частиц варьируется от 100 до 500 нм, что указывает на присутствие как мелких, так и крупных кристаллитов. Таким образом, полученный материал в основном находится в диапазоне нано размеров.

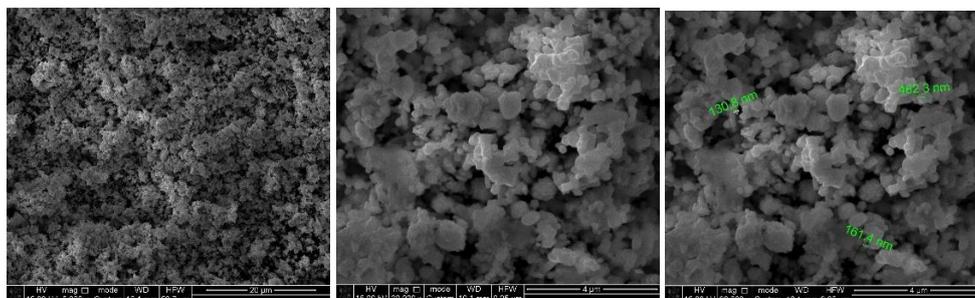


Рисунок 3. Микрофотографии LaNi_5 , синтезированного методом твердофазного спекания из оксидов

Определение влияния типа связующего на электрохимическое поведение электродов на основе LaNi_5

Связующее вещество играет ключевую роль в составе электродного материала, так как оно обеспечивает однородную дисперсию всех компонентов, адгезию электрода к поверхности токосъемника и надежное соединение частиц между собой. Использование подходящего связующего позволяет поддерживать целостность электрода во время эксплуатации, предотвращая его разрушение и деградацию.

Таким образом, связующее не только служит средством объединения частиц, но и способствует созданию перколяционной сети, обеспечивающей эффективное распределение доменов активных частиц по всему объему электрода. Это критически важно для поддержания проводимости и равномерного распределения электрического тока, что напрямую влияет на электрохимические характеристики всего материала.

В данном исследовании было проведено сравнение между различными электродными материалами, приготовленными с использованием связующих PTFE, PE и PVdF. Процесс создания электродов была описана выше.

Электрическая проводимость электродных материалов играет важнейшую роль в определении их электрохимических свойств. Высокая проводимость способствует эффективному переносу электронов в объеме композита анода, что является критическим фактором для повышения производительности электрохимических систем. В нашем исследовании была измерена проводимость электродных материалов, изготовленных с использованием различных связующих веществ, и полученные данные приведены в таблице 2.

Электроды с PTFE в качестве связующего показали высокую проводимость (3100 См/м), свидетельствуя о наименьшей степени блокировки поверхности активного материала LaNi_5 при сохранении механической прочности. Электроды со связующим на основе PVdF продемонстрировали самую низкую проводимость (0,1–10 См/м). Это может быть связано с тем, что PVdF частично блокирует активные поверхности материала, в связи с тем, что он обладает большей текучестью и распределяется на поверхности частиц, снижая эффективность передачи электронов и ограничивая взаимодействие с активными участками. Электроды на основе PE показали наивысшую проводимость ($2,95 \cdot 10^5$ См/м), что свидетельствует о хорошем контакте между частицами и улучшенном распределении тока в материале.

После этого для каждого электрода были сняты циклические вольтамперограммы (ЦВА) с целью оценки их электрохимических характеристик. Результаты показывают, что тип связующего оказывает существенное влияние на электрохимическую активность рабочего материала, значительно изменяя его

поведение в процессе заряда и разряда. Циклические вольтамперные кривые электродов на основе LaNi_5 со связующими PTFE, PVdF, PE представлены на рисунке 4.

Таблица 2. Значения проводимости анодов на основе LaNi_5 с различными связующими

Связующее	Проводимость, См/м
PTFE	3100
PVdF	0,1–10
PE	$2,95 \cdot 10^5$

Электроды с PTFE и PE показали высокие значения пиков тока как при абсорбции, так и при десорбции водорода. Для PTFE максимальный катодный ток достигал около 6000 мА/г, а анодный – около 2500 мА/г. Электроды на основе PE продемонстрировали сопоставимые показатели, с пиками тока около 4000 мА/г для катодного процесса и 1500 мА/г для анодного. Высокая реакционная активность этих электродов может быть обусловлена тем, что PTFE и PE обеспечивают эффективный контакт между частицами активного материала, способствуя быстрой передаче электронов.

Электроды с PVdF показали наименьшие значения пиков тока: максимальные катодные и анодные токи составили примерно 2500 мА/г и 1000 мА/г соответственно. Низкая электрохимическая активность этих электродов может быть связана с тем, что PVdF, будучи непроводящим полимером, может частично изолировать активные поверхности, обволакивая частицы LaNi_5 и препятствуя эффективной сорбции и десорбции водорода. Это согласуется его низкой электропроводностью электродного материала на основе PVdF.

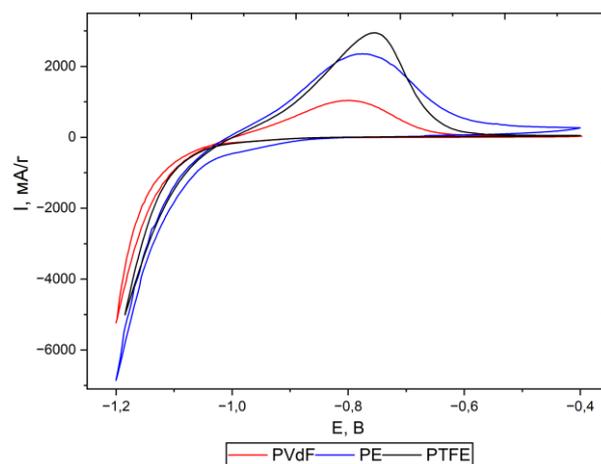
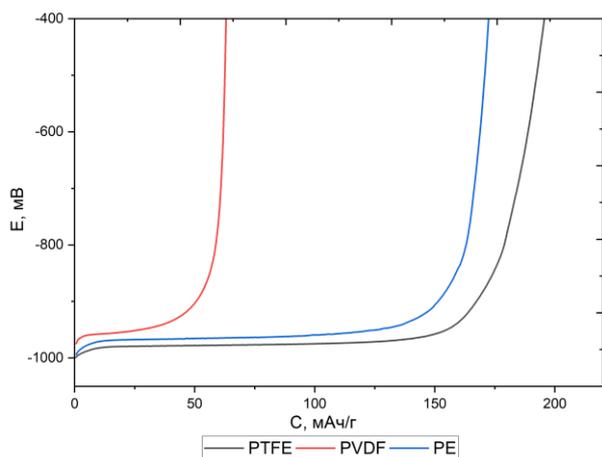


Рисунок 4. Циклические вольтамперные кривые анодов на основе LaNi_5 со связующими PE, PVdF, PTFE

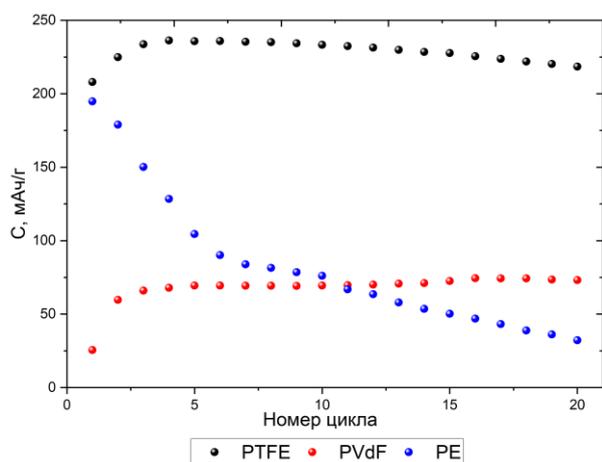
На рисунке 5а представлены кривые гальваностатического разряда первого цикла при токе 1 С для анодов, изготовленных с использованием различных связующих (PTFE, PVdF и PE). Видно, что материал с PTFE демонстрирует наибольшую ёмкость разряда

($\sim 200 \text{ mA}\cdot\text{ч/г}$), что указывает на его высокую эффективность и стабильность в процессе разряда.

Материал с PVdF, напротив, показывает низкую ёмкость разряда ($\sim 50 \text{ mA}\cdot\text{ч/г}$) и резкий рост напряжения, что указывает на быструю потерю ёмкости и меньшую эффективность этого связующего при высоких токах разряда. PE показывает промежуточные результаты между PTFE и PVdF, обеспечивая ёмкость около $150 \text{ mA}\cdot\text{ч/г}$, что свидетельствует о его пригодности для применения, однако не столь высокой эффективности, как у PTFE.



а)



б)

Рисунок 5. (а) – кривая гальваностатического разряда при 1 C (второй цикл); (б) – тест на стабильность циклирования при 1 C (диапазон потенциалов от $-1,2 \text{ В}$ до $-0,4 \text{ В}$ против Hg/HgO)

На рисунке 5б показаны данные длительного гальваностатического циклирования при токе 1 C . Видно, что материалы, изготовленные с использованием PTFE, показал наибольшую начальную ёмкость ($\sim 240 \text{ mA}\cdot\text{ч/г}$). В первые несколько циклов наблюдается процесс активации, при котором ёмкость постепенно растёт, достигая максимального значения на уровне около $240 \text{ mA}\cdot\text{ч/г}$ после постепенно снижа-

лась в течение первых 10 циклов и стабилизировалась на уровне $\sim 200 \text{ mA}\cdot\text{ч/г}$. Этот процесс можно объяснить активацией материала на ранних стадиях циклирования, после структура электрода стабилизируется, и последующее снижение ёмкости становится минимальным. Это свидетельствует о высокой стабильности PTFE как связующего материала, обеспечивающего долгосрочную производительность и устойчивость при многократном циклировании.

Электроды с PVdF показали значительно более низкую начальную ёмкость ($\sim 60 \text{ mA}\cdot\text{ч/г}$), которая оставалась практически неизменной на протяжении всех 20 циклов. Несмотря на стабильность ёмкости, её низкий уровень ограничивает применение PVdF в условиях, требующих высокой ёмкости.

Аноды, изготовленные с PE, продемонстрировали начальную ёмкость около $200 \text{ mA}\cdot\text{ч/г}$, однако уже после нескольких циклов ёмкость начала резко снижаться, и к 20-му циклу упала до $\sim 40 \text{ mA}\cdot\text{ч/г}$. Это указывает на недостаточную механическую стабильность материала при многократном циклировании, что ведёт к быстрой деградации электродов и снижению их эффективности.

Таким образом, PTFE является наиболее предпочтительным связующим для обеспечения высокой ёмкости и стабильности в условиях циклирования, тогда как PVdF демонстрирует стабильную, но низкую ёмкость, а PE характеризуется значительным снижением ёмкости, что ограничивает его применение для длительных циклических процессов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты исследования показали, что тип связующего оказывает значительное влияние на электрохимические свойства анодных материалов на основе LaNi_5 . Связующее PTFE обеспечивает высокую удельную ёмкость и стабильность электродов при многократных циклах заряд-разряд, благодаря способности сохранять прочное соединение частиц и механическую целостность материала, что улучшает процессы сорбции и десорбции водорода.

Хотя PVdF широко используется в электрохимических системах, в данном случае его непроводящая природа и склонность блокировать активные поверхности привели к снижению проводимости и уменьшению удельной ёмкости электродов.

Связующее PE показало нестабильность под циклическими нагрузками, что ограничивает его применение в долговечных аккумуляторах. Значительное снижение ёмкости в процессе циклирования указывает на недостаточную механическую устойчивость этого материала.

Таким образом, для повышения эффективности и долговечности Ni-MH аккумуляторов требуется тщательно подбирать связующие материалы с учётом их влияния на электропроводность, механическую стабильность и взаимодействие с активным материалом. PTFE продемонстрировал лучшие результаты среди протестированных связующих (ёмкость $\sim 200 \text{ mA}\cdot\text{ч/г}$

в течение 20 циклов), однако остаётся важным продолжить исследования, направленные на создание материалов с аналогичными или улучшенными характеристиками.

Благодарность

Работа выполнена в рамках программно-целевого финансирования Министерством науки и высшего образования Республики Казахстан (Грант № BR21882200).

ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES

1. Yu Y. et al. Environmental impact assessment and end-of-life treatment policy analysis for Li-ion batteries and Ni-MH batteries // *Int. J. Environ. Res. Public Health*. – 2014. – Vol. 11, No. 3. – P. 3185–3198.
2. Bala H. et al. Evaluation of electrochemical hydrogenation and corrosion behavior of LaNi₅-based materials using galvanostatic charge/discharge measurements // *Int. J. Hydrogen Energy*. – 2012. – Vol. 37, No. 22. – P. 16817–16822.
3. Jurczyk M. et al. Nanocrystalline LaNi₅-type electrode materials for Ni-MHx batteries // *J. Solid State Chem*. – 2003. – Vol. 171, No. 1–2. – P. 30–37.
4. Nguyen V.A., Kuss C. Review—Conducting Polymer-Based Binders for Lithium-Ion Batteries and Beyond // *J. Electrochem. Soc.* – 2020. – Vol. 167, No. 6. – P. 065501.
5. Züttel A., Meli F., Schlapbach L. Effects of electrode compacting additives on the cycle life and high-rate dischargeability of Zr(V_{0.25}Ni_{0.75})₂ metal hydride electrodes in alkaline solution // *J. Alloys Compd.* – 1994. – Vol. 206, No. 1. – P. 31–38.
6. Li J. et al. Water Soluble Binder, an Electrochemical Performance Booster for Electrode Materials with High Energy Density // *Adv. Energy Mater.* – 2017. – Vol. 7, No. 24.
7. Cholewinski A. et al. Polymer Binders: Characterization and Development toward Aqueous Electrode Fabrication for Sustainability // *Polymers (Basel)*. – 2021. – Vol. 13, No. 4. – P. 631.
8. Bresser D. et al. Alternative binders for sustainable electrochemical energy storage – the transition to aqueous electrode processing and bio-derived polymers // *Energy Environ. Sci.* – 2018. – Vol. 11, No. 11. – P. 3096–3127.
9. Schneider H. et al. Influence of different electrode compositions and binder materials on the performance of lithium–sulfur batteries // *J. Power Sources*. – 2012. – Vol. 205. – P. 420–425.
10. Park B.-H., Choi J.-H. Improvement in the capacitance of a carbon electrode prepared using water-soluble polymer binder for a capacitive deionization application // *Electrochim. Acta*. – 2010. – Vol. 55, No. 8. – P. 2888–2893.
11. Zhang W., Dahbi M., Komaba S. Polymer binder: a key component in negative electrodes for high-energy Na-ion batteries // *Curr. Opin. Chem. Eng.* – 2016. – Vol. 13. – P. 36–44.
12. Nirmale T.C., Kale B.B., Varma A.J. A review on cellulose and lignin based binders and electrodes: Small steps towards a sustainable lithium ion battery // *Int. J. Biol. Macromol.* – 2017. – Vol. 103. – P. 1032–1043.
13. Qin T. et al. Design of functional binders for high-specific-energy lithium-ion batteries: from molecular structure to electrode properties // *Ind. Chem. Mater.* – 2024. – Vol. 2, No. 2. – P. 191–225.
14. Bresser D. et al. Alternative binders for sustainable electrochemical energy storage—the transition to aqueous electrode processing and bio-derived polymers // *Energy Environ. Sci. Royal Society of Chemistry*. – 2018. – Vol. 11, No. 11. – P. 3096–3127.
15. Chen H. et al. Exploring Chemical, Mechanical, and Electrical Functionalities of Binders for Advanced Energy-Storage Devices: review-article // *Chem. Rev. American Chemical Society*. – 2018. – Vol. 118, No. 18. – P. 8936–8982.
16. Zhang Y., Guo J., Li T. Research progress on binder of activated carbon electrode // *Adv. Mater. Res.* – 2012. – Vol. 549. – P. 780–784.
17. Ahmad D. et al. Hydrophilic and hydrophobic materials and their applications // *Energy Sources, Part A Recover. Util. Environ. Eff. Taylor & Francis*. – 2018. – Vol. 40, No. 22. – P. 2686–2725.
18. Joubert J.-M. et al. LaNi₅ related AB₅ compounds: Structure, properties and applications // *J. Alloys Compd.* – 2021. – Vol. 862. – P. 158163.

LaNi₅ НЕГІЗІНДЕГІ АНОДТАРДЫҢ ЭЛЕКТРОХИМИЯЛЫҚ ҚАСИЕТТЕРІНЕ БАЙЛАНЫСТЫРУШЫ МАТЕРИАЛДЫҢ ӘСЕРІН ТАЛДАУ

С. Д. Мәлік¹, С. Қ. Әбдімомын¹, М. К. Скаков², Е. Т. Коянбаев³, А. Ж. Миниязов³, Ф. И. Мальчик^{1*}

¹ *әл-Фараби атындағы Қазақ Ұлттық университеті, Алматы, Қазақстан*

² *«Қазақстан Республикасының Ұлттық ядролық орталығы» РМК, Курчатов, Қазақстан*

³ *ҚР ҰЯО РМК «Атом энергиясы институты» филиалы, Курчатов, Қазақстан*

* Байланыс үшін E-mail: frodo-007@mail.ru

Энергия сақтау жүйелерінің экологиялық қауіпсіздігі мен тиімділігіне қойылатын талаптардың өсуіне байланысты никель-металлгидридті (Ni-MH) аккумуляторлар қауіпсіздігі мен қолжетімділігі арқасында назар аударуды жалғастыруда. Мұндай аккумуляторлардың компоненттерін оңтайландыру олардың электрохимиялық сипаттамалары мен ұзақ мерзімді тұрақтылығын жақсарту үшін басым міндет болып табылады. Негізгі компоненттердің бірі – гидрид түзуші қорытпа негізіндегі анодтар, олардың тұрақтылық және сыйымдылық сияқты электрохимиялық қасиеттері, циклдік зарядтау және разрядтау кезінде анодтың құрылымдық тұтастығына, өткізгіштігіне және тұрақтылығына әсер ететін байланыстырушы материалды таңдауға айтарлықтай тәуелді. Бұл жұмыста Ni-MH аккумуляторларына арналған LaNi₅ негізіндегі анодтардың электрохимиялық

қасиеттеріне әртүрлі полимерлік байланыстырушы материалдардың әсері зерттелген. LaNi_5 қорытпасы металл оксидтерінен қатты фазалы әдіспен синтезделді, оның құрылымы рентгендік фазалық талдау әдісімен расталды. Зерттеу үшін үш түрлі байланыстырушы материалдарды қолдана отырып электродтар жасалды: политетрафторэтилен (PTFE), поливинилиденфторид (PVdF) және ультрадисперсті полиэтилен (PE). Анодтардың электрохимиялық сипаттамалары циклдік вольтамперометрия және гальваностатикалық заряд-разряд әдістерімен зерттелді. Нәтижелер байланыстырушы материалдың түрі электродтардың электр өткізгіштігіне, сыйымдылығына және циклдік тұрақтылығына айтарлықтай әсер ететінін көрсетті. PTFE байланыстырушы материалымен жасалған анодтар жоғары меншікті сыйымдылықпен (~200 $\text{mA}\cdot\text{сaғ}/\text{г}$) және көп циклды процесте тұрақтылықпен ең жақсы электрохимиялық сипаттамаларды көрсетті. PE негізіндегі электродтар жоғары бастапқы сыйымдылықты, бірақ циклдеу кезінде тез деградацияны көрсетті, ал PVdF негізіндегі анодтар тұрақты, бірақ төмен сыйымдылықпен сипатталды. Зерттеу байланыстырушы материалды дұрыс таңдаудың Ni-MH аккумуляторларының өнімділігін оңтайландыруда шешуші рөл атқаратынын дәлелдейді.

Түйін сөздер: никель-металлгидридті аккумуляторлар, LaNi_5 , полимерлік байланыстырушы материалдар, политетрафторэтилен, поливинилиденфторид, полиэтилен.

STUDY OF THE EFFECT OF BINDER MATERIAL CHOICE ON THE ELECTROCHEMICAL PROPERTIES OF LaNi_5 BASED ANODES

S. D. Malik¹, S. K. Abdimomyn¹, M. K. Skakov², Ye. T. Koyanbayev³, A. Z. Miniyazov³, F. I. Malchik^{1*}

¹ *al-Farabi Kazakh National University, Almaty, Kazakhstan*

² *RSE “National Nuclear Center of the Republic of Kazakhstan”, Kurchatov, Kazakhstan*

³ *Branch “Institute of Atomic Energy” RSE NNC RK, Kurchatov, Kazakhstan*

* *E-mail for contacts: frodo-007@mail.ru*

With growing demands for environmental sustainability and efficiency in energy storage systems, nickel-metal hydride (Ni-MH) batteries continue to attract attention due to their safety and affordability. Optimization of components in such batteries is a priority task for improving their electrochemical characteristics and durability. One of the key components is anodes based on hydrogen-forming alloys, whose electrochemical properties, such as stability and capacity, significantly depend on the choice of binder material, which affects the structural integrity, conductivity, and resilience of the anode during cyclic charging and discharging. This paper investigates the influence of various polymer binders on the electrochemical properties of anodes based on LaNi_5 for Ni-MH batteries. The LaNi_5 alloy was synthesized using the solid-phase method from metal oxides, and its structure was confirmed by X-ray phase analysis. Electrodes were fabricated using three types of binders: polytetrafluoroethylene (PTFE), polyvinylidene fluoride (PVdF), and polyethylene (PE). The electrochemical characteristics of the anodes were studied using cyclic voltammetry and galvanostatic charge-discharge methods. Results showed that the type of binder substantially affects the electrical conductivity, capacity, and cycling stability of the electrodes. Anodes with PTFE binder demonstrated the best electrochemical characteristics, high specific capacity (~200 mAh/g), and stability during multiple cycling. Electrodes with PE showed high initial capacity but rapid degradation during cycling, while anodes with PVdF were characterized by stable but low capacity. The study confirms that the choice of binder material is crucial for optimizing the performance of Ni-MH batteries.

Keywords: nickel-metal hydride batteries, LaNi_5 , polymer binders, polytetrafluoroethylene, polyvinylidene fluoride, polyethylene.

<https://doi.org/10.52676/1729-7885-2025-1-46-52>
УДК 519.876.5

ОПТИМИЗАЦИЯ ЗАДАНИЯ МНОГОМЕРНОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЭНЕРГОВЫДЕЛЕНИЯ В ОБЪЕКТЕ ИСПЫТАНИЯ ДЛЯ CFD МОДЕЛИРОВАНИЯ

А. С. Сураев¹, Е. А. Қабдылқаков¹, О. М. Жанболатов¹, Г. А. Витюк¹, Д. М. Секен^{1,2*}

¹ Филиал «Институт атомной энергии» РГП НЯЦ РК, Курчатов, Казахстан

² Университет имени Шакарима города Семей, Семей, Казахстан

* E-mail для контактов: seken@nnc.kz

CFD моделирование – широко распространенный инструмент, применяемый для компьютерного анализа в различных сферах, в том числе и в реакторной теплофизике. Так, в стенах Национального ядерного центра Республики Казахстан, с целью выполнения расчетного анализа безопасности облучательных ампульных устройств перед их внутрореакторными испытаниями применяется программа ANSYS FLUENT. Помимо анализа безопасности проводимых реакторных испытаний, данная программа используется для подбора режимов испытаний, выбора и обоснования диаграммы изменения мощности реактора, оценки теплового состояния отдельных элементов конструкции и т.д. Особенность программного комплекса Ansys Fluent заключается в ограниченности функционала графического пользовательского интерфейса (GUI), который используется большинством пользователей программы на всех этапах выполнения расчетного анализа от подготовки расчетной модели и до обработки результатов. С другой стороны, текстовый пользовательский интерфейс (TUI) и пользовательские функции (UDF) применяются реже, при том, что их совместное использование предоставляет широкие возможности по оптимизации расчетного процесса, повышению качества результатов и экономии времени и вычислительных ресурсов. В этой связи актуальной стала задача разработки специализированного программного обеспечения (программы), которое способствует легкому внедрению UDF файлов в расчетный анализ. В работе представлена компьютерная программа консольного типа, разработанная в среде Visual Basic для автоматического формирования UDF файлов на основе входных данных. Входными данными являются файлы с временным и высотным (радиальным) профилем энерговыделения. Преимущества программы: простота использования (не требует навыков программирования), скорость создания UDF файлов, точность написания функции (исключение ошибок, связанных с ручным вводом большого количества информации).

Ключевые слова: *Ansys Fluent, UDF, профиль энерговыделения, массив данных, программа, оптимизация расчетов.*

ВВЕДЕНИЕ

ANSYS Fluent – это программный комплекс предназначенный для решения широкого спектра физических задач методом конечных элементов, который входит в состав программного средства ANSYS [1]. При этом основной акцент сделан на тепловой, гидравлический анализ, взаимодействие частиц и проблемы горения материалов. При проведении расчетов в рамках анализа безопасности проводимых реакторных испытаний различных объектов испытаний, основным исследуемым параметром является температура элементов экспериментального устройства [2, 3].

На точность и правильность моделирования в программе ANSYS FLUENT влияет несколько факторов, одним из которых является правильная подготовка расчетной модели, включая: (1) геометрические параметры модели, (2) параметры сетки конечных элементов, (3) свойства материалов с учетом температурных зависимостей и (4) правильность заданных граничных условий, к которым в том числе и относится внутреннее удельное энерговыделение, возникающее в топливных и конструктивных элементах объекта испытаний под действием нейтронов во время реакторного пуска. При этом, при работе с

внутренним удельным энерговыделением в программе ANSYS FLUENT, возникает ряд сложностей, которые объясняются: (1) большим количеством значений, которое может достигать сотен тысяч для одного материала (элемента), (2) вариативностью профилей энерговыделения по объему модели, (3) требованием четкого соответствия нейтронно-физической модели, в которой эти значения были рассчитаны, (4) нелинейностью временной диаграммы изменения мощности реактора, а значит и внутреннего энерговыделения в элементах объекта испытаний. Решение этих проблем стандартными средствами программы ANSYS FLUENT не представляется возможным и требует применения специализированных физических моделей [4] и пользовательских функций (UDF) [5, 6]. Однако фактором, лимитирующим широкое использование пользовательских функций в ежедневной работе, является отсутствие навыков программирования на языке Си у большинства пользователей программного комплекса ANSYS FLUENT.

Таким образом актуальной стала задача разработки специализированного программного средства, которое оптимизирует и автоматизирует процесс создания UDF файла, содержащего набор переменных, процедур, функций, макросов ANSYS FLUENT и ал-

горитмов языка Си, на основе имеющихся файлов с энерговыделением. Особенность программы заключается в ее универсальности. Она подходит как для двумерной, так и для трехмерной геометрии, а файлы с энерговыделением могут иметь различные варианты распределения от простых двумерных таблиц до четырехмерных массивов.

МЕТОДЫ ЗАДАНИЯ ЭНЕРГОВЫДЕЛЕНИЯ В ANSYS FLUENT

Использование стандартных интерфейсов

Как упоминалось ранее, существует два варианта работы с программой ANSYS FLUENT: с помощью графического или текстового интерфейсов [7]. В первом случае процесс задания энерговыделения в ячейке (материале) будет соответствовать схеме, показанной на рисунке 1. Последовательный переход по нескольким окнам программы позволяет задать одно значение энерговыделения для одной расчетной зоны, в данном примере для зоны *fuel-1* задано значение 8000 Вт/м³.

Во втором случае, при использовании текстового интерфейса, появляется возможность оптимизиро-

вать этот процесс за счет исключения многократного ручного ввода данных в диалоговых окнах (рисунок 2). Также такой способ гарантирует точность введенных данных, повторяемость и позволяет автоматизировать процесс путем написания простых алгоритмов.

Основной недостаток этих способов заключается в том, что с их помощью невозможно сформировать профиль энерговыделения ни по высоте топливного столба, ни по радиусу, ни по времени. Соответственно ни один из этих вариантов не подходит для задания сложного многомерного профиля энерговыделения с учетом объемного и временного распределения [8]. Следовательно, единственным вариантом задания такого распределения остается использование UDF функций. Помимо этого, применение UDF функции позволяет в реальном времени отслеживать объемную долю каждого материала, подвергающегося плавлению и перемещению в ячейках расчетной области и задавать соответствующее количество энергии в эти ячейки [9, 10].

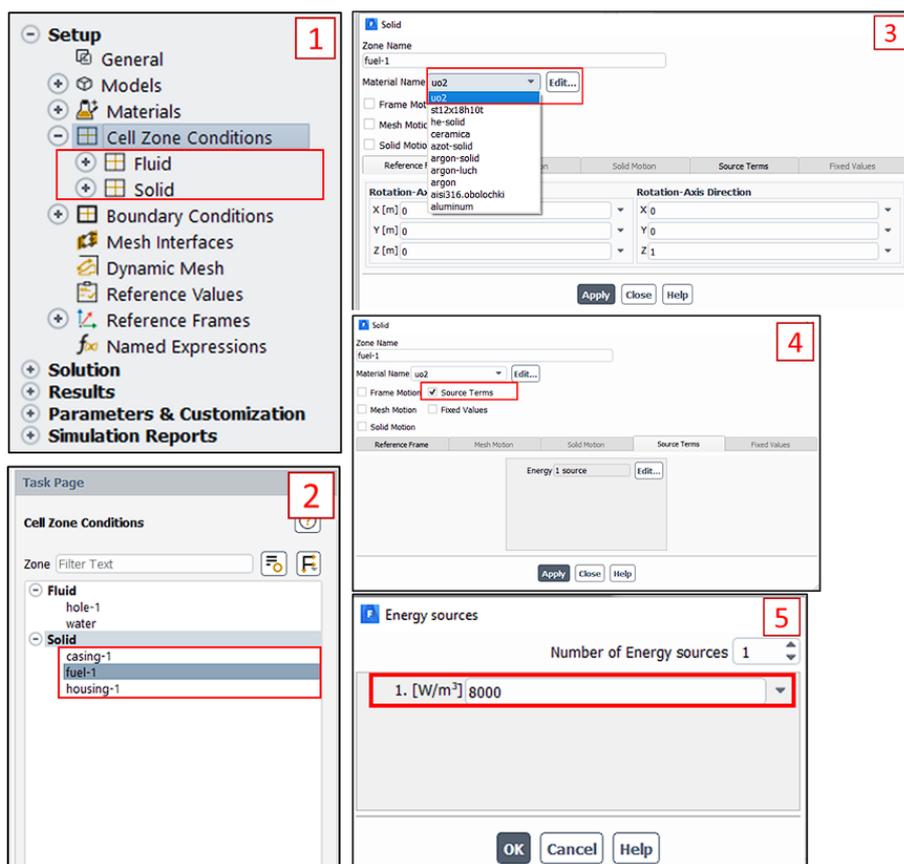


Рисунок 1. Процесс задания энерговыделения (одно значение) с помощью GUI

```
1 /define/boundary-conditions/solid fuel_1 yes uo2 yes 1 yes 8000 no no no
2
```

Рисунок 2. Процесс задания энерговыделения (одно значение) с помощью TUI

**Использование файлов с данными
о энерговыделении**

Возможно несколько вариантов распределения энерговыделения (E) по элементам расчетной модели: (1) распределение вдоль осей x , y или z , (2) радиальное распределение, (3) распределение по времени, (4) комбинация предыдущих вариантов. Рассмотрим некоторые из таких вариантов подробнее.

Для **двумерной геометрии** мы имеем две координаты направления (x , y), радиус вектор (r) и время ($time$), комбинируя которые можем получить:

1) Один трехмерный массив данных, в котором энерговыделение распределено в декартовой сетке координат $E(x, y, time)$. Такой вариант удобен только для плоских прямоугольных моделей и используется не часто.

2) Два двумерных массива, когда распределение энерговыделения задано только по высоте модели $E(zx, time)$ или $E(zy, time)$. Здесь и далее для двумерной геометрии z это не ось аппликата, а условный признак высоты, указывающий на то, какая из двух осей выбрана для высотного распределения.

3) Два трехмерных массива данных, в которых энергия будет распределена как по высоте, так и по радиус вектору $E(zx, ry, time)$ или $E(zy, rx, time)$.

4) Четыре двумерных массива, в которых данные изменяются только по одному из направлений и времени $E(zx, time)$, $E(zy, time)$, $E(rx, time)$, $E(ry, time)$. Этот вариант распределения, как и предыдущий, удобен для большинства типовых моделей тепловыделяющих элементов, ТВС, оболочек, обечаск, корпусов и т.д. (для цилиндрической осесимметричной геометрии).

5) Последний наиболее простой способ распределения данных о энерговыделении только по одному из направлений или времени. Тем самым получим пять одномерных массивов с энерговыделением: $E(x)$, $E(y)$, $E(rx)$, $E(ry)$ или $E(time)$. Применение такого распределения актуально, когда есть необходимость исследовать одиночные топливные таблетки, элементы измерительной системы или конструкционные

элементы имеющие малые размеры или те, в которых распределением энерговыделения по остальным направлениям можно пренебречь в рамках задачи.

На рисунке 3 показан фрагмент файла, содержащий двумерный массив данных о распределении энерговыделения вдоль одной из осей и по времени.

В случае комбинации осевого и радиального распределения энерговыделения файл будет иметь вид, показанный на рисунке 4. В этом случае имеется трехмерный массив, в котором 7 значений по времени, 163 значения по оси (высота топлива) и 7 значений по радиусу топливных элементов (всего 7987 значений).

Для **трехмерной геометрии** добавляется координата z . В этом случае можем получить:

1) Один четырехмерный массив $E(x, y, z, time)$ в декартовых координатах, который удобно применять для трехмерной кубической модели объекта испытаний [3].

2) Три двумерных массива $E(x, time)$, $E(y, time)$, $E(z, time)$ для вариантов, когда интересует распределение энерговыделения только вдоль одной из осей и по времени.

3) Также возможен вариант с тремя трехмерными массивами $E(x, y, time)$, $E(x, z, time)$, $E(y, z, time)$, которые подходят для специфической геометрии расчетной модели.

4) Добавление радиальной компоненты позволяет сформировать еще три трехмерных массива $E(x, r, time)$, $E(y, r, time)$, $E(z, r, time)$. Данные распределения хорошо подходят для задания энерговыделения элементам с цилиндрической геометрией (ТВЭЛы, ТВС, оболочки и пр.).

Следует отметить то, что все файлы, содержащие массивы данных о энерговыделении, формируются автоматически после обработки результатов нейтронно-физического расчета в специально разработанной программе [11]. Далее будет описана структура UDF файла, который необходим для правильного распределения значений энерговыделения из файлов по конечным элементам расчетной области.

Распределение вдоль оси (x , y или z)

1	0.0000	-1.2600	-1.2500	-1.2400	-1.2300	-1.2200	-1.2100
2	0.0000	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
3	3.1000	8.11E+07	8.03E+07	7.93E+07	7.85E+07	7.79E+07	7.69E+07
4	4.4000	8.11E+07	8.03E+07	7.93E+07	7.85E+07	7.79E+07	7.69E+07
5	6.4000	1.20E+07	1.19E+07	1.17E+07	1.16E+07	1.15E+07	1.14E+07
6	14.700	1.20E+07	1.19E+07	1.17E+07	1.16E+07	1.15E+07	1.14E+07
7	15.610	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
8	16.000	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00

Массив энерговыделений, Вт/м³

Рисунок 3. Фрагмент файла с двумерным массивом данных $E(zx, time)$

1	7	163	7					
2	0	3.1	4.4	6.4	14.7	15.61	10000	
3	-2.59	-2.58	-2.57	-2.56	-2.55	-2.54	-2.53	-2.52
4	0.0222	0.0295	0.0325	0.0385	0.0438	0.0467	0.048	
5	9.445e+09							
6	9.465e+09							
7	9.410e+09							
8	9.295e+09							
9	9.228e+09							
10	1.036e+10							
11	1.016e+10							
12	9.997e+09							
13	1.004e+10							
14	9.841e+09							
15	9.691e+09							
16	9.567e+09							
17	1.064e+10							
18	1.039e+10							
19	1.058e+10							
20	1.029e+10							
21	1.022e+10							
22	1.017e+10							
23	1.015e+10							
24	1.063e+10							

5. Массив энерговыделений, Вт/м³

1. Размерности массивов
2. Распределение по времени
3. Распределение вдоль оси (x, y или z)
4. Распределение по радиусу (r, радиус-вектор)

Рисунок 4. Фрагмент файла с трехмерным массивом данных E (zx, ry, time)

СТРУКТУРА UDF ФАЙЛА

В этом разделе рассмотрено содержание типового UDF файла, который применяется для распределения энерговыделения по объему расчетной зоны и времени согласно заданной диаграммы изменения мощности реактора. Такой вид файла будет взят за основу при написании программы для создания UDF файлов.

Файл пользовательской функции представляет собой текстовый файл написанный на языке Си и содержащий набор команд, которые можно разделить на блоки: (1) блок объявления переменных, функций

и констант, (2) блок макросов ANSYS Fluent, (3) блок функций и процедур.

В первом блоке происходит первичное объявление всех необходимых переменных, констант и массивов, выполняется задание начальных значений и размерностей. Во втором блоке в виде отдельных процедур описаны макросы Ansys Fluent. Существует более десятка макросов [12], но для задания профиля энерговыделения достаточно трех макросов: DEFINE_ON_DEMAND, DEFINE_ADJUST и DEFINE_SOURCE.

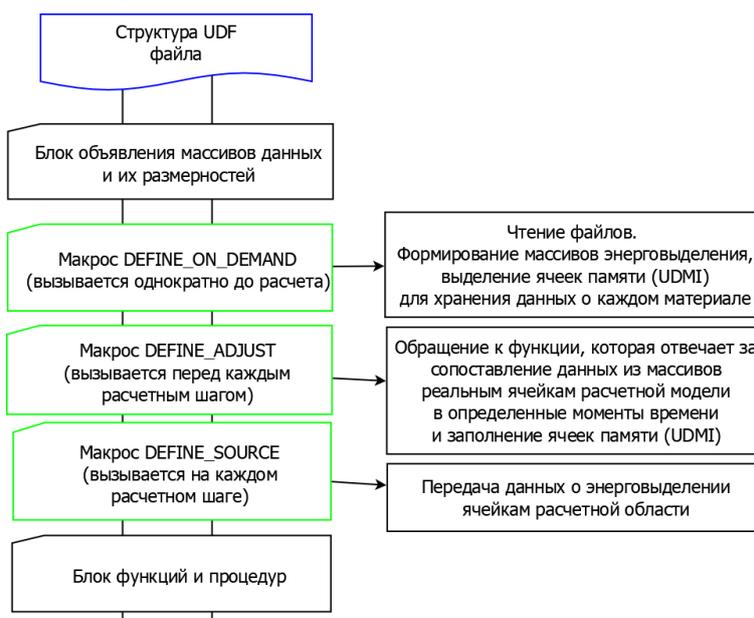


Рисунок 5. Структура UDF файла

Макрос DEFINE_ON_DEMAND предназначен для однократного выполнения записанных в его рамках команд и может быть вызван пользователем вручную до запуска решателя на расчет. Это свойство макроса позволяет использовать его для предварительной загрузки данных о энерговыделении из файлов и их размещении в памяти решателя. Таким образом достаточно длительный процесс чтения текстовых файлов, содержащих тысячи и даже сотни тысяч значений энерговыделения может быть выполнен до начала расчета, что существенно снижает нагрузку на центральный процессор и оперативную память.

Макрос DEFINE_ADJUST выполняется автоматически перед каждым расчетным шагом во время процесса решения и необходим для вызова функции, которая отвечает за правильность распределения прочитанных из файлов значений энерговыделений по объему расчетной зоны и времени. После проведения необходимых вычислений функция возвращает конкретное значение энерговыделения, соответствующее точному расположению в расчетной зоне и помещает это значение в ячейку памяти (UDMI) программы Ansys Fluent.

Макрос DEFINE_SOURCE отвечает за передачу значений энерговыделения из ячеек памяти в расчетную зону. Он также, как и предыдущий макрос выполняется на каждом расчетном шаге. Синтаксис этого макроса может иметь два вида: (1) для задач, в которых не подразумевается плавление материалов, (2) для задач, в которых подразумевается плавление и перемещение материала по всей расчетной области.

Третий блок UDF файла содержит саму функцию (процедуру), обращение к которой происходит в теле макроса DEFINE_ADJUST. Данная функция предназначена для сопоставления данных о энерговыделении, прочитанных из файлов, с ячейками расчетной зоны, а также для отслеживания реального расчетного времени и диаграммы изменения мощности реактора по времени. Функция также имеет возможность интерполяции значений энерговыделения по време-

ни, что позволяет проводить расчеты с небольшим количеством временных точек.

АЛГОРИТМ РАБОТЫ ПРОГРАММЫ

С помощью среды программирования Visual Studio на языке VB.Net [14] была разработана консольная программа UDF_creator, назначение которой заключается в автоматическом создании UDF файла на основе имеющихся файлов с профилем энерговыделения. Основными элементами программы, размещенными в корневой папке, являются: (1) исполняемый файл программы, (2) файлы энерговыделений, (3) файл инициализации и (4) сгенерированный UDF файл.

Особенность программы заключается в том, что с ее помощью определяются размерности массивов энерговыделений записанных в файлах эта информация является ключевой для успешной работы UDF функции. Так как программа Fluent способна работать только с заранее определенными типами и размерностями массивов данных, а использование динамических массивов не дало положительных результатов. Также программа ответственна за учет файлов с энерговыделением, выделение определенного количества ячеек памяти для каждого файла и взаимодействие между отдельными блоками UDF файла. Схематически алгоритм работы программы представлен на рисунке 6 в виде блок-схемы.

Для корректной работы программы необходимо подготовить файлы, содержащие энерговыделение и файл инициализации, в котором указаны некоторые ключевые параметры, зависящие от конкретной модели: (1) тип массивов в файлах с энерговыделениями, (2) вектор (x, y, z) , вдоль которого задано высотное распределение, (3) активация модели многофазных течений (VOF + SM). Таким образом программа получает всю необходимую информацию о модели и энерговыделении, которая необходима для создания UDF файла.

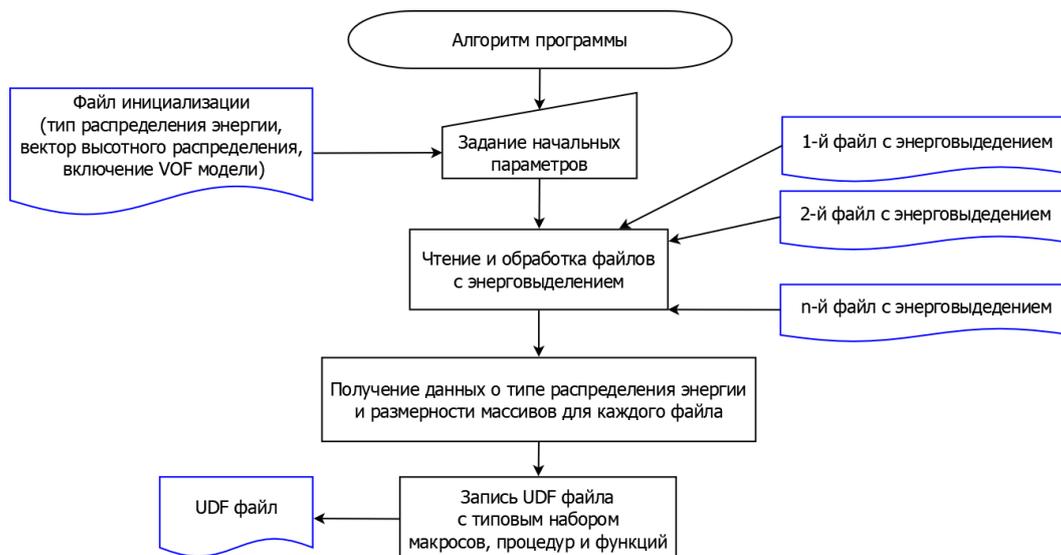


Рисунок 6. Алгоритм работы программы

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработана компьютерная программа, с помощью которой решается проблема задания многомерных профилей энерговыделения в топливных и конструкционных материалах объектов испытаний. Комбинация специальных физических моделей многофазных течений с многомерными массивами значений энерговыделения и пользовательской функцией позволила смоделировать сложные теплогидравлические процессы в объекте испытаний, сопровождающиеся образованием расплава топлива и конструкционных материалов и их перемещением по расчетной области.

Универсальность программы позволяет использовать ее для формирования UDF файлов, которые будут работоспособны с любой конструкцией объекта испытаний как в двумерной, так и в трехмерной постановке. Работа с программой не требует знания языков программирования и сводится к простой настройке файла инициализации в соответствии с конкретной задачей.

Работа выполнена при финансовой поддержке Комитета науки Министерства науки и высшего образования в рамках проекта грантового финансирования AP19577709 «Развитие методов CFD моделирования для описания процессов, сопровождающих развитие тяжелой аварии ядерного энергетического реактора».

ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES

1. ANSYS, Inc. Products Release 2021 R1. Academic research Mechanical and CFD.
2. Vityuk V., Vityuk G., Vurim A., Irkimbekov R., Kuku-shkin I., Surayev A., Mukhamedov N. Testing of a heterogeneous fuel rod in the research Impulse graphite reactor // Progress in Nuclear Energy. – 2023. – Vol. 164. – P. 104889. ISSN 0149-1970. <https://doi.org/10.1016/j.pnucene.2023.104889>
3. Surayev A. S. et al. Impact assessment of the IGR graphite block uneven impregnation with uranium on thermal strength properties // Вестник. Серия Физическая (ВКФ). – 2022. – Т. 82. – № 3. – С. 52–59. [Surayev A. S. et al. Impact assessment of the IGR graphite block uneven impregnation with uranium on thermal strength properties // Vestnik. Seriya Fizicheskaya (VKF). – 2022. – Vol. 82. – Issue 3. – P. 52–59.]
4. Eickhoff M., Rückert A., Pfeifer H. Solidification modeling with User defined function in Ansys Fluent // Progress in Applied CFD – CFD2017 Selected papers from 12th International Conference on Computational Fluid Dynamics in the Oil & Gas, Metallurgical and Process Industries. – SINTEF Academic Press, 2017.
5. Manual U.D.F. ANSYS FLUENT 12.0 // Theory Guide. – 2021.
6. Yerzhan Kabdylkakov, Artur Surayev, Ruslan Irkimbekov (2022) New approaches to CFD analysis of experimental devices in the Ansys Fluent // AIP conference proceedings, 3020, 040008 (2024). <https://doi.org/10.1063/5.0194184>
7. ANSYS FLUENT Text Command List Release 2021// Command List. – 2020
8. Kabdylkakov Y.A., Suraev A.S. Application of the *volume of fluid* method to simulate the process of melting and movement of fuel // NNC RK Bulletin. – 2021. Issue 3(87). – P. 3–8. (In Russ.). <https://doi.org/10.52676/1729-7885-2021-3-3-8>
9. Kabdylkakov Y.A., Suraev A.S. Modeling of heat-strength interaction of fuel and structural materials of an irradiating device in the ANSYS software // NNC RK Bulletin. – 2023. – Issue 3(95). – P. 63–71. (In Russ.) <https://doi.org/10.52676/1729-7885-2023-3-63-71>
10. Surayev A.S., Irkimbekov R.A., Stepanova O.A. Simulation of interaction between material and melt of nuclear fuel // Book of Abstracts of International online conference “Advanced manufacturing materials and research: New technologies and techniques AMM&R2021”. – Ust-Kamenogorsk, D. Serikbayev EKTU, 2021. – P.42.
11. Жанболатов О.М., Сураев А.С. Программа управления для моделирования динамических параметров импульсного графитового реактора // Сборник трудов XX Международной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Перспективы развития фундаментальных наук», 25–28 апреля 2023 г., Томск. [Zhanbolatov O.M., Surayev A.S. Program for control of modeling the dynamic parameters of a pulse graphite reactor // Collection of works of XX International conference of students, graduate and young scientists «Perspectives of development of fundamental sciences», April, 25–28, 2023, Tomsk. (In Russ.)]
12. ANSYS Fluent Customization Manual. Ansys Inc. Products Release 2021 R1, January 2021.
13. Vick, Paul. The Visual Basic.Net Programming Language // Addison-Wesley Professional. – 2004.

СЫНАҚ ОБЪЕКТИСІНДЕ CFD МОДЕЛЬДЕУ ҮШІН КӨПӨЛШЕМДІ ЭНЕРГИЯ БӨЛУ ТАПСЫРМАСЫН ОҢТАЙЛАНДЫРУ

А. С. Сураев¹, Е. А. Қабдылқаков¹, О. М. Жанболатов¹, Г. А. Витюк¹, Д. М. Секен^{1,2*}

¹ ҚР ҰЯО РМК «Атом энергиясы институты» филиалы, Курчатова, Қазақстан

² Семей қаласының Шәкәрім атындағы университеті, Семей, Қазақстан

* Байланыс үшін E-mail: seken@nnc.kz

CFD модельдеу – бұл әртүрлі салаларда, соның ішінде реакторлық жылу физикасында компьютерлік талдау үшін қолданылатын кең таралған құрал. Осылайша, Қазақстан Республикасы Ұлттық ядролық орталығының қабырғасында сәулелендіру ампулалық құрылғылардың қауіпсіздігіне есептік талдау жүргізу мақсатында олардың реакторішілік сынақтарының алдында ANSYS FLUENT бағдарламасы қолданылады. Қауіпсіздікті талдаудан басқа, бұл бағдарлама сынақ режимдерін таңдау, реактор қуатының өзгеру диаграммасын таңдау және негіздеу, құрылымның жекелеген элементтерінің жылулық күйін бағалау және т.б. үшін қолданылады. Ansys Fluent бағдарламалық кешенінің ерекшелігі графикалық пайдаланушы интерфейсінің (GUI) функционалының шектеулігінде, ол есептік талдау жүргізудің барлық кезеңдерінде – есептік модельді дайындаудан бастап нәтижелерді өңдеуге дейін – бағдарламаны пайдаланушылардың көпшілігі қолданады. Екінші жағынан, мәтіндік пайдаланушылық интерфейс (TUI) және пайдаланушылық функциялар (UDF) сирек қолданылады, алайда оларды бірлесіп пайдалану есептеу процесін оңтайландыру, нәтижелер сапасын арттыру, уақыт пен есептеу ресурстарын үнемдеу үшін кең мүмкіндіктер береді. Осыған байланысты есептік талдауға UDF файлдарын оңай енгізуді қамтамасыз ететін арнайы бағдарламалық жасақтама (бағдарлама) әзірлеу қажеттілігі туындады. Жұмыста кіріс деректері негізінде UDF файлдарын автоматты түрде қалыптастыру үшін Visual Basic ортасында жасалған консоль түріндегі компьютерлік бағдарлама ұсынылған. Кіріс деректер энергияның уақыт пен биіктік (радиалды) профилі көрсетілген файлдар болып табылады. Бағдарламаның артықшылықтары: қолданудың қарапайымдылығы (бағдарламалау дағдыларын қажет етпейді), UDF файлдарын құрудың жылдамдығы, функция жазудың дәлдігі (көп ақпаратты қолмен енгізуге байланысты қателіктерді болдырмау).

Түйін сөздер: *Ansys Fluent, UDF, энергия бөлу профилі, деректер массиві, бағдарлама, есептеулерді оңтайландыру.*

OPTIMIZATION OF MULTIDIMENSIONAL ENERGY DISTRIBUTION IN TEST DEVICE FOR CFD MODELING

A. S. Surayev¹, Ye. A. Kabdylkakov¹, O. M. Zhanbolatov¹, G. A. Vityuk¹, D. M. Seken^{1,2*}

¹ Branch “Institute of Atomic Energy” RSE NNC RK, Kurchatov, Kazakhstan

² Shakharam University of Semey, Semey, Kazakhstan

* E-mail for contacts: seken@nnc.kz

CFD modelling is a widely used tool for computer analysis in various fields, including reactor thermophysics. Thus, in the walls of the National Nuclear Center of the Republic of Kazakhstan, for the purpose of carrying out safety analysis of irradiated devices before their in-pile tests, the program ANSYS FLUENT is used. In addition to the safety analysis of reactor tests being conducted, this program is used for the selection of test modes, selection and justification of the diagram of the change of the power of the reactor, evaluation of the thermal state of individual structural elements, etc. The special feature of the Ansys Fluent software complex is the limited functionality of the graphical user interface (GUI), which is used by most users of the program at all stages of calculation analysis from preparation of the calculation model to processing of results. On the other hand, the text-based user interface (TUI) and user-defined functions (UDF) are used less frequently, although their combined use provides extensive opportunities for optimizing the computational process, improving result quality, and saving time and computing resources. In this regard, the task of developing a specialized software (program) that facilitates easy implementation of UDF files into calculation analysis has become urgent. The article presents a console-type computer program developed in Visual Basic environment for automatic generation of UDF files based on input data. Input data are files contain time and height (radial) energy distribution profiles. Advantages of the program: easy to use (no programming skills required), speed of creation of UDF files, accuracy of writing function (elimination of errors related to manual input of a large amount of data).

Keywords: *Ansys Fluent, UDF, energy profile, data array, program, calculation optimization.*

<https://doi.org/10.52676/1729-7885-2025-1-53-63>

УДК 550.34.098: 551.324.63

СЕЙСМОЛОГИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ЛЕДНИКОВЫХ ПРОЦЕССОВ ВЫСОТНОГО ТЯНЬ-ШАНЯ

А. Е. Шокпарбай*, Н. Н. Михайлова

Филиал «Институт геофизических исследований» РГП НЯЦ РК, Курчатов, Казахстан

* E-mail для контактов: shokparbai@list.ru

В последние годы криосейсмология стала важным направлением исследований, предоставляя новые возможности для изучения динамики ледников и их взаимодействия с климатическими изменениями. Эта междисциплинарная наука, объединяющая сейсмологию и гляциологию, открывает новые перспективы для анализа процессов в криосфере. В 2023 году в Национальном ядерном центре Республики Казахстан в рамках Программы целевого финансирования (ПЦФ) «Применение ядерных, сейсмических и инфразвуковых методов для оценки климатических изменений» начались исследования ледников Тянь-Шаня сейсмическим и инфразвуковым методами. Установлены три временные сейсмические и инфразвуковая станции на казахстанской территории в 70–150 км от масштабных ледников высотного Тянь-Шаня. Дополнительно привлекались данные двух стационарных станций, расположенных на расстояниях 130 и 160 км от ледников: станции Шалкоде (130 км), которая входит в состав сети Национального научного центра сейсмических наблюдений и исследований Министерства по чрезвычайным ситуациям Республики Казахстан (ННЦСНИ МЧС РК), и станции Подгорное (160 км), принадлежащей Институту геофизических исследований Национального ядерного центра Республики Казахстан (ИГИ НЯЦ РК). Эти станции, размещенные на скальных основаниях, продемонстрировали высокую эффективность в регистрации слабых сигналов ледниковой активности. Исследования подтверждают значимость криосейсмологических подходов для анализа ледниковых процессов и их связи с изменениями климата.

Ключевые слова: ледниковые землетрясения, Тянь-Шань, криосейсмология, энергетический класс, магнитуда, сейсмические станции, мониторинг.

ВВЕДЕНИЕ

В последнее десятилетие в мире начало развиваться новое направление исследований – криосейсмология, новый инструмент изучения динамики ледников. Криосейсмология – междисциплинарная наука, объединяющая два направления наук о Земле – сейсмологию и гляциологию. Сейсмические сигналы от широкого круга процессов, связанных с ледниками, заполняют довольно большой диапазон частот (от 10^{-3} до 10^2 Гц) и значительный интервал по магнитуде (от -3 до 7), что позволяет по-новому взглянуть на фундаментальные процессы в криосфере [1].

Ситуация с изучением ледников и процессов в них изменилась после открытия глобально детектируемых сейсмических событий, связанных со сбросом льда в океан [1, 2]. Первые работы Горана Экстрёма и др. были посвящены землетрясениям, связанным с обрушением ледников Гренландии.

Число научных исследований в этой области резко возросло, что привело к установке новых сейсмических сетей, написанию новых статей и докладов (рисунок 1). Мониторинг состояния и активности ледников имеет большое значение для наблюдений за изменениями климата планеты и влиянием этих процессов на окружающую среду. В последние годы использование криосейсмологии становится популярным подходом для изучения динамики ледников. По сейсмическим записям можно наблюдать процессы и делать выводы о внутреннем и подледниковом состоянии в ранее недоступных местах. Криосейсмо-

логия на основе регистрации сейсмических и инфразвуковых волн исследует процессы на границах «лед – океан» и «лед – земная поверхность».

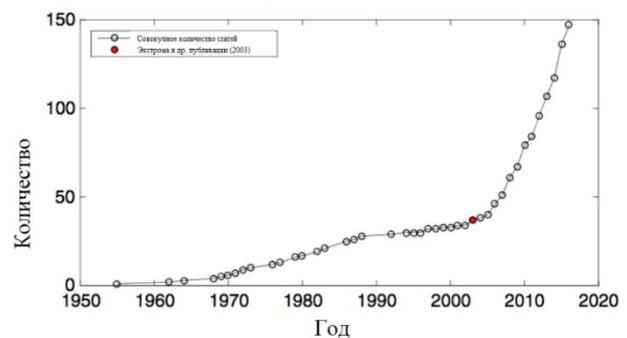


Рисунок 1. Общее количество статей по пассивной ледниковой сейсмичности, 1950–2016 гг. (из работы [3]). Красной точкой показан момент выхода статьи Г. Экстрёма.

Самая значительная часть криосейсмологических исследований связана с арктической зоной. Значительно меньше исследований проводилось в континентальных горных районах. Одним из основных процессов, вызывающих ледниковые землетрясения, является образование трещин/распадов на поверхности ледника. Обычно магнитуда M_w таких событий не превышает 1 [4]. Изучение этих событий дает ценную информацию о степени устойчивости ледника на местности. Второй механизм связан с течением ледника, непрерывным или дискретным, с которым так-

же связано образования сейсмических волн. Как правило, эти события имеют магнитуду $M_w \sim 3$ [5, 6].

Сейсмический метод изучения не только дает нам важный инструмент для понимания как ледник взаимодействует с окружающей средой, но и для мониторинга стабильности ледников.

В Центральной Азии по горным районам Памира и Тянь-Шаня почти нет работ по криосейсмологии, хотя хорошо известно, что здесь находится большое количество масштабных ледников. Особенно интересным представляется изучение ледника Энгильчек в области высотного Тянь-Шаня. В последние годы внимание к исследованию этого ледника было уделено в работе, проводимой сотрудниками Центрально-Азиатского института прикладных исследований Земли (ЦАИИЗ, Бишкек, Кыргызстан) совместно с Немецким центром исследований Земли (GFZ), Потсдам, Германия. В 2019 г. появилась статья Усупаева, Асминга В.Е., и др. «О землетрясениях гляциотектонического характера горных стран на примере ледника Энгильчек в бассейне реки Сары-Джаз Киргизского Тянь-Шаня» [7]. На леднике была установлена сейсмическая станция «Мерцбахер», по записям которой был выявлен ряд сейсмических событий, ассо-

циируемых с активностью ледников. По одной станции Мерцбахер за два месяца март и апрель 2018 года обнаружено 179 событий, магнитуда от 0,9 до 2,5. По спектрам наиболее сильных событий все они были разделены на две группы: с преобладающими частотами 1,5–2,5 Гц и 3–5 Гц.

Но первой работой по Центральной Азии в изучении ледовых землетрясений горных ледников была работа авторов из Центра данных ИГИ НЯЦ РК Михайловой Н. Н и Комарова И. И [8]. В этой работе авторы анализировали большое количество однообразных по волновой картине записей событий, практически ежедневно наблюдающихся по данным тогда недавно открытой сейсмической группы Маканчи (рисунок 2). Авторами определены азимуты и расстояния до источника. Все события локализовались в области ледников высотного Тянь-Шаня (рисунок 3). Были изучены графики повторяемости этих событий, их суточные и сезонные вариации. Была высказана версия, что эти события являются сейсмическими проявлениями ледниковых процессов. Других прецедентов в описании подобных явлений даже по мировым литературным данным по горным ледникам в то время не было.

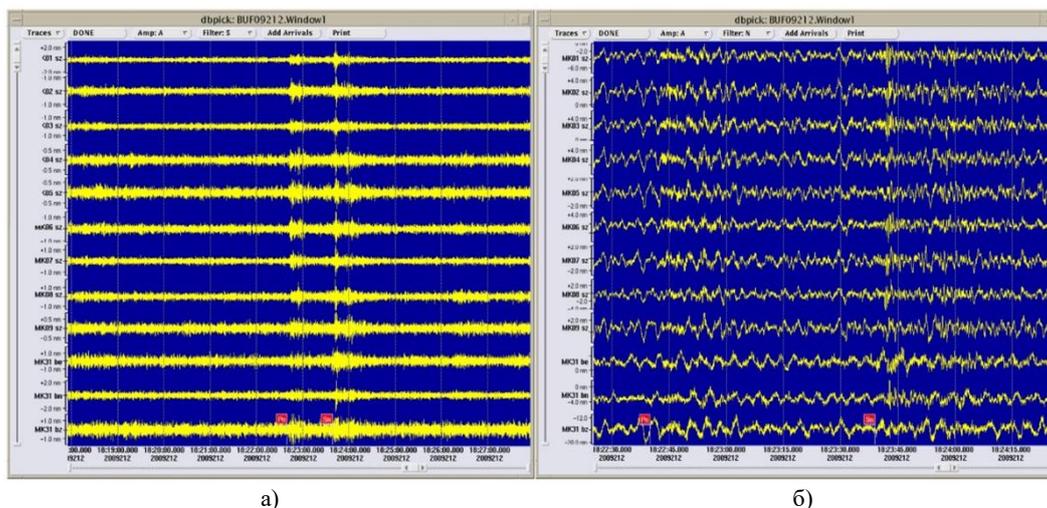


Рисунок 2. Вид записей исследуемых событий, регистрируемых станцией PS23-Маканчи (MKAR): а – обзорная; б – отдельная запись события всеми элементами группы [8]

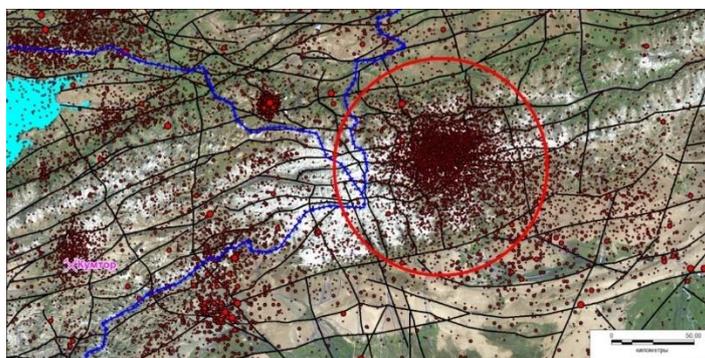


Рисунок 3. Эпицентры землетрясений в районе высотного Тянь-Шаня (около 2000 событий) по данным станции MKAR (Маканчи) за 2004 – 2008 гг. на геоморфологической карте [8].

1. СОЗДАНИЕ ВРЕМЕННОЙ СЕТИ СЕЙСМИЧЕСКИХ СТАНЦИЙ ВБЛИЗИ ЛЕДНИКА

В 2023 г. в НЯЦ РК начались работы по ПЦФ «Применение ядерных, сейсмических и инфразвуковых методов для оценки климатических изменений и смягчения изменений климата». В этой программе одна из задач «Оценка влияния климатических изменений на режим проявления ледотрясений, отражающих процесс таяния масштабных ледников Тянь-Шаня, по сейсмическим и инфразвуковым данным» непосредственно касается исследований криосферы. В рамках этих работ в конце 2023 г. были проведены первые полевые работы с установкой временных сейсмических и инфразвуковой станции. Общая схема расположения временных сейсмических станций относительно ледников показана на рисунке 4.

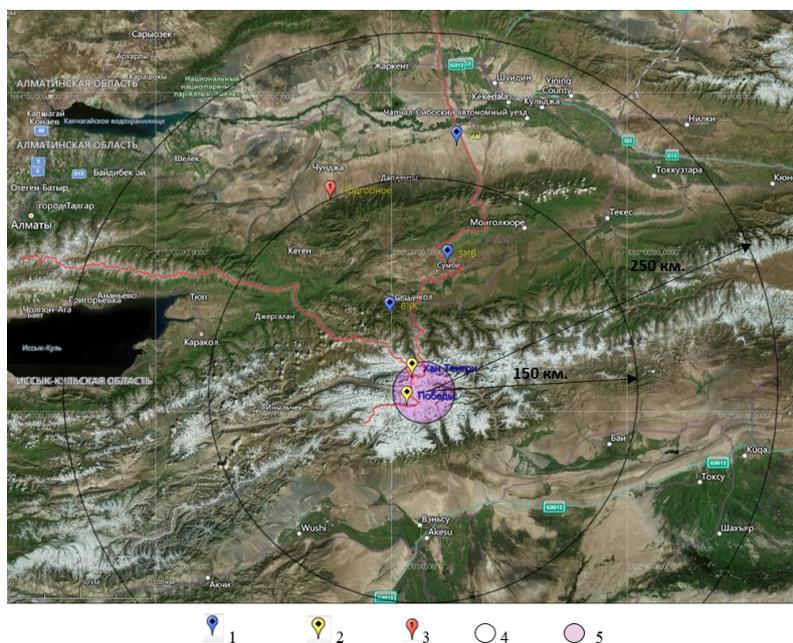
На полевых станциях была установлена следующая аппаратура: сейсмометр CM640-T (Guralp, Анг-

лия); дигитайзер DAS 6501 (РМД, Канада); микробарометр MB 2005 (Seismo Wave, Франция);

На рисунке 5 показан общий вид места расположения аппаратуры. В таблице 1 представлены координаты расположения сейсмических и инфразвуковой станции. Уже первый анализ полученных данных позволил обнаружить на записях целевые сейсмические сигналы, ассоциированные как ледниковые события (рисунки 6–9).

Таблица 1. Координаты расположения сейсмо-инфразвукового комплекса

Название станции (код)	Координаты		
	С.Ш., °	В.Д., °	Высота над уровнем моря, м
Калжат (KLJ)	43,666657	80,556309	751
Сумбе (SMB)	42,92819	80,47845	1826
Баянкол (BNK)	42,599319	79,988804	2241



1 – места установки сейсмо-инфразвукового оборудования; 2 – пики Победы и Хан-Тенгри; 3 – сейсмостанция «Подгорное»; 4 – окружности на расстоянии 150 и 250 км от центра ледника; 5 – район наиболее высоких пиков Тянь-Шаня

Рисунок 4. Общая схема расположения района работ и места расстановки сейсмо-инфразвуковых приборов



Рисунок 5. Общий вид места расположения записывающей аппаратуры, сейсмометра и микробарометра

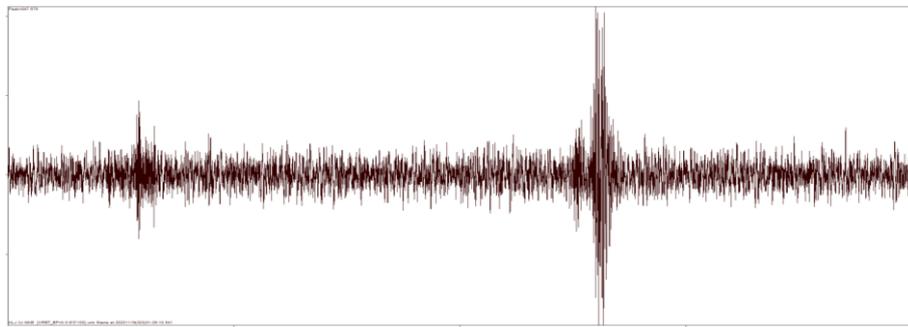


Рисунок 6. Запись инфразвуковой станцией Калжат (KLJ) события (01:29 19.11.2023 г.), ассоциированного как вероятное ледниковое

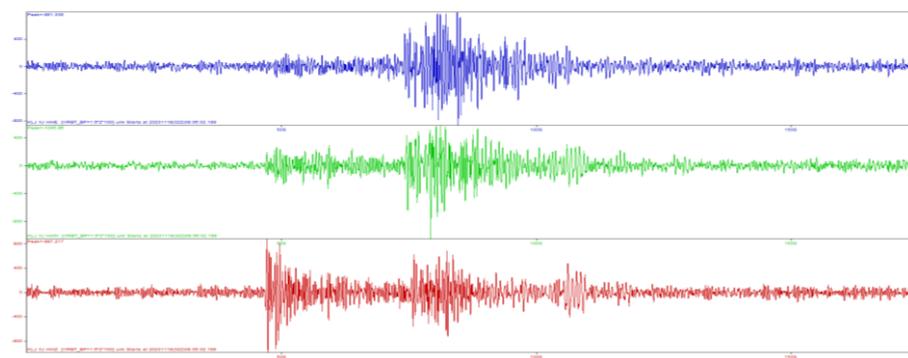


Рисунок 7. Запись сейсмической станцией Калжат (KLJ) события (08:05 18.11.2023 г.), ассоциированного как вероятное ледниковое

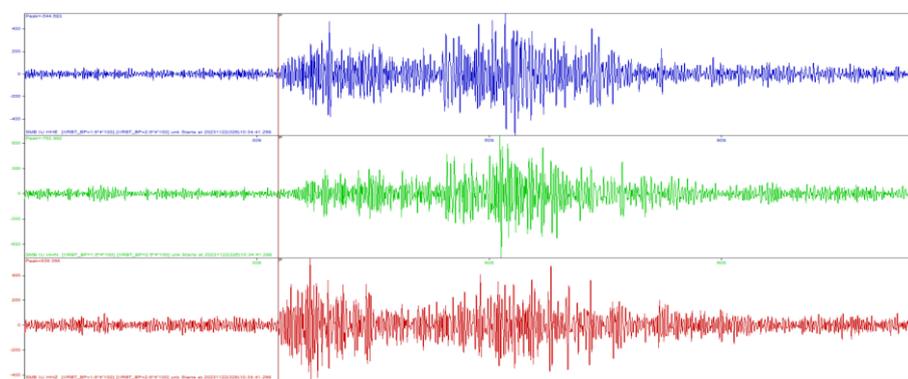


Рисунок 8. Запись сейсмической станцией Сумбе (SMB) события (08:05 18.11.2023 г.), ассоциированного как вероятное ледниковое

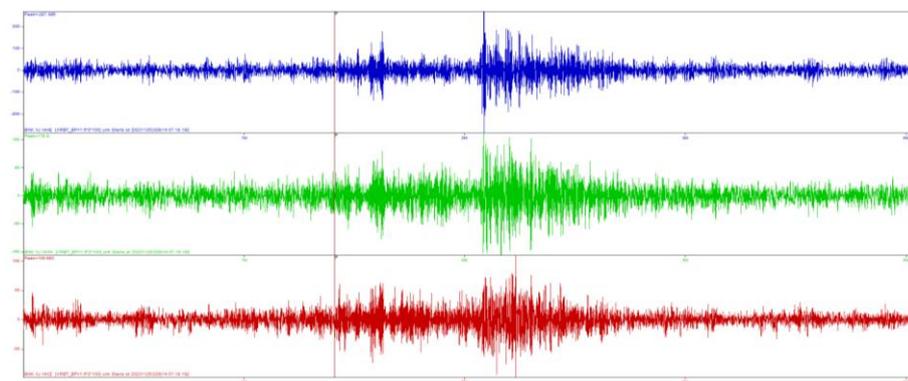


Рисунок 9. Запись сейсмической станцией Баянкол (BNK) события (14:07 25.11.2023 г.), ассоциированного как вероятное ледниковое

2. ОБРАБОТКА ДАННЫХ

Для обработки полученных данных использовались различные подходы, включая автоматическую и ручную обработку.

2.1 Автоматическая обработка данных

Для автоматической обработки применялась система NSDL, позволяющая детектировать и проводить

локализацию событий [9]. На рисунке 10 показан пример обнаружения сигналов по станции Калжат и поиска местоположения эпицентра автоматической системой обработки NSDL. Всего по трем полевым станциям, проработавшим с 17 по 25 ноября 2023 г., найдено и локализовано 17 событий (таблица 2). Их эпицентры приурочены к зоне основных ледников Тянь-Шаня (рисунок 11).

Таблица 2. Основные параметры сейсмических событий, ассоциированных как ледниковые землетрясения по трем станциям

№	Дата	Время	Координаты		Название станции (код)
			С.Ш., °	В.Д., °	
1	17.11.2023	13.28:32.4	42,089	79,742	Калжат (KLJ)
2	17.11.2023	14.34:08.8	42,027	80,672	Калжат (KLJ)
3	17.11.2023	15.27:31.9	42,000	80,595	Калжат (KLJ)
4	17.11.2023	16.38:27.4	42,188	80,591	Калжат (KLJ)
5	17.11.2023	19.51:13.2	41,988	79,952	Калжат (KLJ)
6	17.11.2023	23.23:05.8	42,089	80,295	Калжат (KLJ)
7	21.11.2023	11.04:24.1	42,315	79,735	Сумбе (SMB)
8	21.11.2023	11.18:46.0	42,132	80,746	Сумбе (SMB)
9	21.11.2023	12.14:10.5	42,305	80,688	Сумбе (SMB)
10	21.11.2023	12.37:23.4	42,150	80,645	Сумбе (SMB)
11	21.11.2023	19.31:57.5	41,914	80,843	Сумбе (SMB)
12	22.11.2023	2.40:43.2	42,120	80,853	Сумбе (SMB)
13	22.11.2023	7.39:54.1	42,099	80,655	Сумбе (SMB)
14	22.11.2023	17.34:57.4	42,205	80,796	Сумбе (SMB)
15	23.11.2023	3.41:27.8	42,049	79,590	Сумбе (SMB)
16	24.11.2023	06.46:02.1	42,235	80,262	Баянкол (BNK)
17	25.11.2023	00.26:22.6	42,061	80,025	Баянкол (BNK)

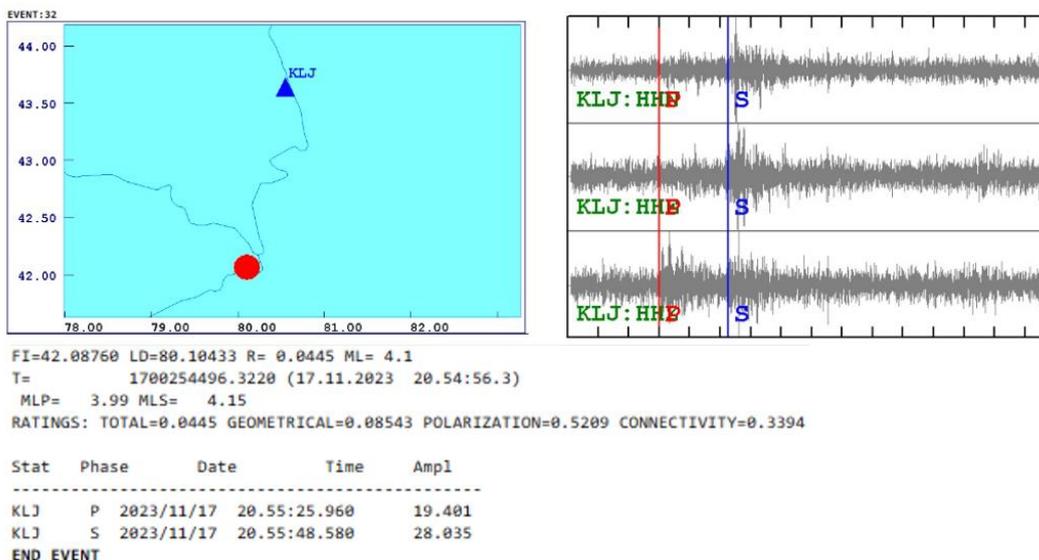


Рисунок 10. Пример детектирования, локализации сейсмического события и его основные параметры, полученные в системе NSDL. Станция Калжат

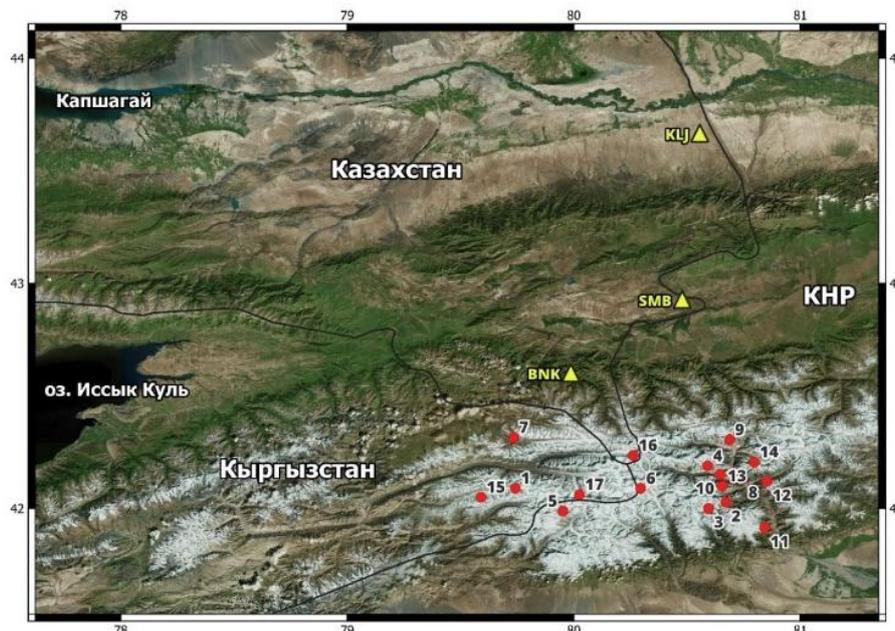


Рисунок 11. Карта эпицентров сейсмических событий (●), ассоциированных с ледниками по данным полевых станций (▲)

2.2 Обработка данных полевых и стационарных станций ближней зоны

На втором этапе для повышения точности локализации к данным полевых станций были добавлены данные двух стационарных станций. Это станция Подгорное (PDGK) сети ИГИ НЯЦ РК и Шалкоде (SHLS) сети ННЦСНИ МЧС РК. Станция Подгорное (PDGK) расположена на расстоянии 160 км от ледника, а станция Шалкоде (SHLS) – на расстоянии 130 км. Аппаратура на обеих станциях установлена на скальном основании, что делает их очень эффективными в регистрации слабых сигналов от ледников. На рисунке 12 показаны записи станции Подгорное

ное (PDGK) и Шалкоде (SHLS), на которых четко выражены сигналы от ледниковых землетрясений. Станция Калжат, расположена на расстоянии 140 км от ледника, Сумбе – 70 км и Баянкол – 60 км. Для обработки данных использовались программы из пакета DATASCOPE, в частности, dbpick и dbloc2. В результате анализа и обработки записей были зарегистрированы 33 землетрясения с эпицентрами в зоне ледника. Диапазон магнитуд m_{rv} [10] зарегистрированных землетрясений составляет 2,5–3,5, а энергетических классов R [11] – 6,1–7,9. Карта эпицентров локализованных событий представлена на рисунке 13.

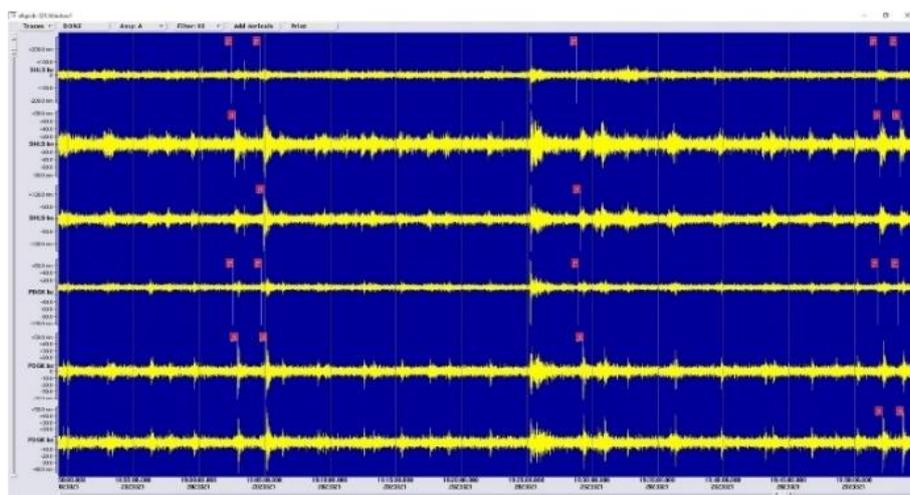


Рисунок 12. Вид записей с сигналами от ледниковых землетрясений по станциям Шалкоде и Подгорное. Верхние трассы – три компоненты записи Шалкоде, нижние – три компоненты станции Подгорное

Таблица 3. Основные параметры сейсмических событий, ассоциированных как ледниковые землетрясения, по данным полевых и стационарных станций ближней зоны

№	lat	lon	date	j/day	time	mpv	K
1	42,0064	80,5974	11/17/2023	321	12:26:20	2,7	7,28
2	41,8880	80,7306	11/17/2023	321	13:06:23	2,69	6,88
3	42,0239	80,8093	11/17/2023	321	13:28:33	2,77	6,72
4	41,9051	80,6288	11/17/2023	321	13:47:46	2,97	7,04
5	42,0841	80,5417	11/17/2023	321	17:45:12	2,73	6,74
6	42,1438	80,7125	11/17/2023	321	18:31:29	2,68	6,87
7	42,1385	80,6743	11/17/2023	321	19:02:05	2,76	6,93
8	42,0868	80,5278	11/17/2023	321	19:51:16	2,73	6,93
9	42,1883	80,6280	11/17/2023	321	20:09:07	2,84	7,01
10	42,2405	80,7638	11/18/2023	322	13:52:32	2,95	7,32
11	42,2267	80,6109	11/18/2023	322	00:33:41	3,05	7,46
12	42,1247	80,5641	11/18/2023	322	15:05:54	2,62	6,78
13	42,1751	80,5736	11/18/2023	322	16:10:43	3,23	7,41
14	41,8620	79,6956	11/18/2023	322	16:49:33	2,95	7,44
15	42,0887	80,6087	11/18/2023	322	23:02:19	3,04	7,52
16	42,2404	80,8142	11/18/2023	322	22:31:46	3,08	7,67
17	42,1757	80,5613	11/18/2023	322	23:29:00	2,84	7,37
18	42,1731	80,6991	11/18/2023	322	23:32:19	3,1	7,8
19	42,2312	80,6016	11/18/2023	322	16:06:36	2,72	6,95
20	42,1555	80,6216	11/18/2023	322	17:30:53	2,6	6,36
21	42,2268	80,5680	11/18/2023	322	18:44:07	2,84	6,79
22	42,1238	80,6372	11/18/2023	322	23:12:24	3,02	7,47
23	42,0423	80,5018	11/19/2023	323	00:37:22	2,98	7,92
24	42,1995	80,7940	11/21/2023	325	20:23:51	2,56	6,4
25	42,3096	80,9567	11/21/2023	325	22:51:12	2,64	7,3
26	42,2559	80,9272	11/22/2023	326	18:38:33	2,73	6,85
27	42,2924	80,8146	11/24/2023	328	18:19:02	2,66	6,56
28	42,1921	80,8621	11/24/2023	328	20:50:36	2,57	6,56
29	42,2738	80,8036	11/25/2023	329	00:03:47	2,55	6,51
30	41,9832	81,0106	11/25/2023	329	16:23:26	3,51	6,1
31	41,9356	79,5466	11/25/2023	329	19:06:27	3,12	7,45
32	42,2681	80,8211	11/25/2023	329	20:04:57	3	7,5
33	42,2453	80,8940	11/26/2023	330	05:30:25	2,56	6,42

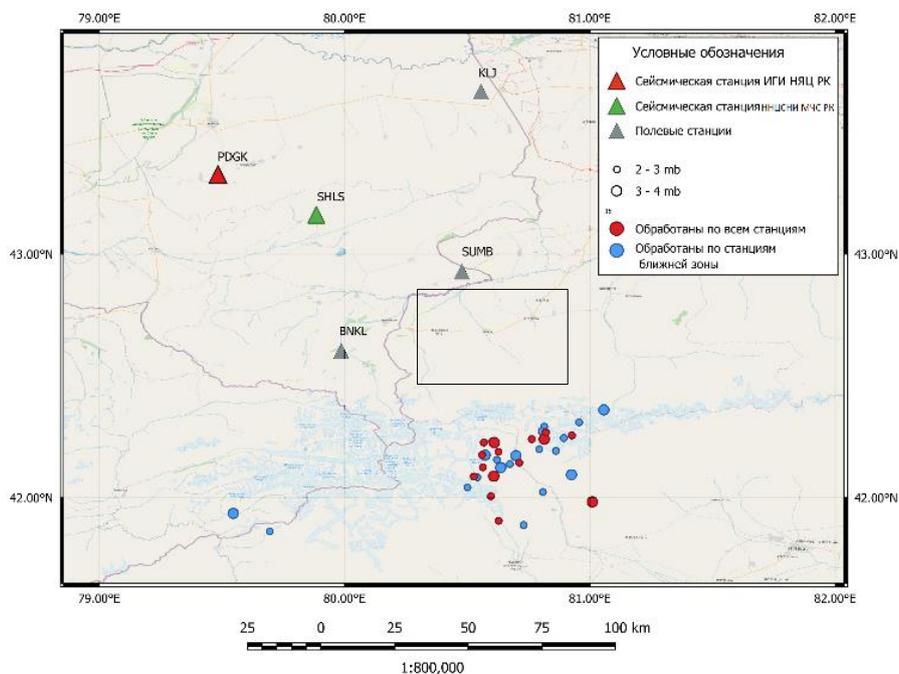


Рисунок 13. Карта расположения станций ближней зоны и эпицентров зарегистрированных землетрясений

2.3 Совместная обработка и анализ данных станций ближней и дальней зоны

Далее в задачи настоящей работы входило изучение того, какие из зарегистрированных станциями ближней зоны событий регистрируются сейсмической группой Маканчи, находящейся на расстоянии более 550 км от ледника. Из 33 событий, обнаруженных и локализованных по станциям ближней зоны (таблица 3), 15 событий зарегистрированы также и сейсмической группой Маканчи. Установлено, что большинство событий с энергетическим классом не меньше 6,1 регистрируются далекой сейсмической группой Маканчи. То есть, версия, высказанная в статье [8] в 2009 г. о том, что группа Маканчи регистрирует

и может локализовать именно ледниковые события, становится доказанной. На рисунке 14 приведены записи ледникового землетрясения 25 ноября 2023 г. в 16 h 23 m, зарегистрированного станциями ближней зоны и сейсмической группой Маканчи. Проведен анализ значений азимутов на источник, полученных по группе Маканчи на основе F-k анализа, а также на основе результатов локализации по станциям ближней зоны. Диапазоны этих азимутов практически совпадают (таблица 4). На рисунке 15 приведена карта эпицентров, полученных по данным станций ближней зоны и совместно с сейсмической группой Маканчи. Эпицентры расположены очень близко между собой.

Таблица 4. Основные параметры сейсмических событий, ассоциированных как ледниковые землетрясения по сейсмической группе Маканчи

№	Дата	j/day	T ₀	φ	λ	MKAR Az - F-k (S _n волны)	MKAR Az - расчет	R, км от MKAR
1	11/17/2023	321	12:26:20	42,0064	80,5974	186,2	194,823	560
2	11/17/2023	321	13:47:46	41,9051	80,6288	182,9	194,291	524
3	11/17/2023	321	18:31:29	42,1438	80,7125	186,3	194,214	547
4	11/17/2023	321	19:51:16	42,0868	80,5278	191,6	195,639	542
5	11/17/2023	321	20:09:07	42,1883	80,6280	192,5	195,073	542
6	11/18/2023	322	13:52:32	42,2405	80,7638	188,4	194,028	547
7	11/18/2023	322	00:33:41	42,2267	80,6109	196,6	195,335	542
8	11/18/2023	322	15:05:54	42,1247	80,5641	186,8	195,440	547
9	11/18/2023	322	23:02:19	42,0887	80,6087	191,2	194,955	551
10	11/18/2023	322	22:31:46	42,2404	80,8142	186,3	193,580	542
11	11/18/2023	322	23:29:00	42,1757	80,5613	184,5	195,614	497
12	11/18/2023	322	18:44:07	42,2268	80,5680	188,3	195,710	529
13	11/22/2023	326	18:38:33	42,2559	80,9272	189,3	192,609	538
14	11/25/2023	329	16:23:26	41,9832	81,0106	192,3	191,251	542
15	11/25/2023	329	20:04:57	42,2681	80,8211	187,1	193,592	542

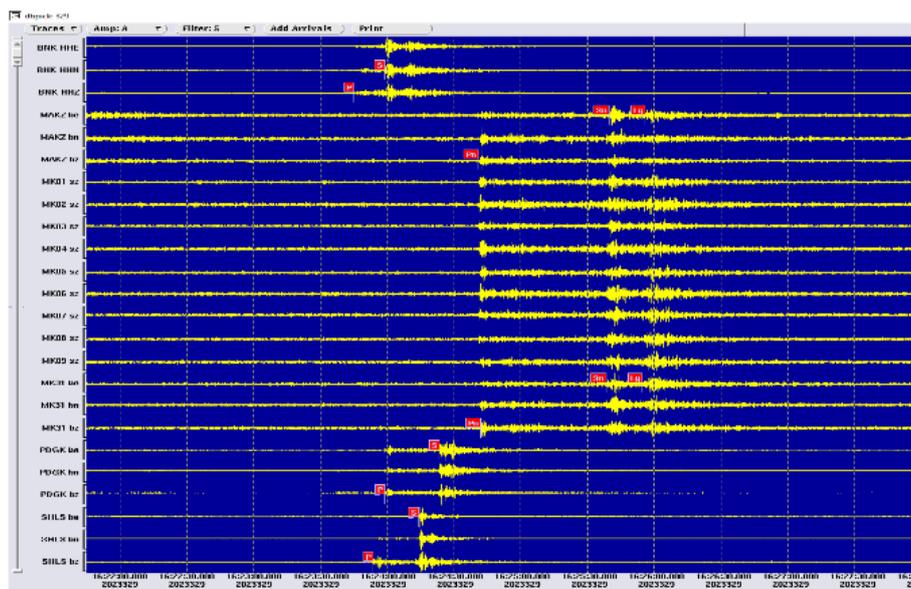


Рисунок 14. Записи ледникового землетрясения станциями ближней зоны и группой Маканчи, энергетический класс 6,1

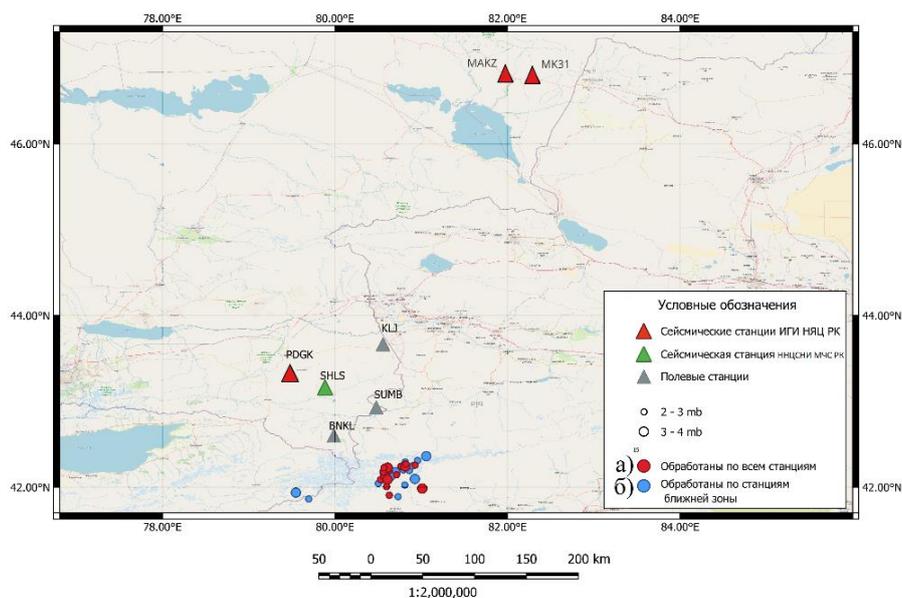


Рисунок 15. Расположение станций ближней зоны и сейсмической группы Маканчи (MKAR) и эпицентров землетрясений в ледниковой зоне, полученных: а) совместно станциями ближней зоны с сейсмической группой Маканчи; б) только по станциям ближней зоны

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Полученные результаты свидетельствуют о том, что высказанная в 2009 году [8] версия о том, что множество сигналов, регистрируемых станцией Маканчи с одного и того же азимута, являются событиями ледниковой природы, убедительно подтвердилась. Сейсмическая группа Маканчи регистрирует практически все события с энергетическим классом более 6 на расстоянии более 500 км с эпицентрами в зоне масштабных ледников. Следовательно, имея материал по группе Маканчи за более, чем 20 лет (станция открыта в 2001 г.), мы можем провести изучение закономерностей проявления режима ледников по активности событий, вариаций их количества, спектрального состава, распределения событий по площади ледника под воздействием климатических изменений.

Данные исследования выполнены в рамках программно-целевого финансирования Комитета науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан BR21881915 «Применение ядерных, сейсмических и инфразвуковых методов для оценки климатических изменений и смягчения последствий изменения климата».

ЛИТЕРАТУРА

- Ekström G., M. Nettles and G. A. Abers Glacial earthquakes // Science. – 2003, – Vol. 302 (5645). – P. 622–624. <https://doi.org/10.1126/science.1088057>
- Ekström G., M. Nettles and V. C. Tsai Seasonality and increasing frequency of Greenland glacial earthquakes // Science. – 2006. – Vol. 311(5768). – P. 1756–1758. <https://doi.org/10.1126/science.1122112>
- E. Podolsky, F. Walter. Cryoseismology // Reviews of Geophysics. – 2016. – P. 708–758. <https://doi.org/10.1002/2016RG000526>
- А. В. Федоров, В. Э. Асминг. Низкочастотные землетрясения архипелага Шпицберген // Комплексные исследования природы Шпицбергена // Материалы международной научной конференции. Мурманск, 1–3 ноября, 2012 г. – М., – 2012. – Вып.11. – С. 249–253.
- Kanao, M. A Decade of Advances in Cryoseismology // Polar Seismology. – 2018a – Advances and Impact. IntechOpen.
- Kanao, M. (2018b). A New Trend in Cryoseismology: A Proxy for Detecting the Polar Surface Environment // Polar Seismology. – 2018b. – Advances and Impact, 75.
- Усупаев Ш. Э., Асминг В. Э., Шаршебаев А. К., Алтынбек уулу Т., Рахматилла уулу З., Анаркулов Б. А. О землетрясениях гляциотектонического характера горных стран на примере ледника Энгилчек в бассейне реки Сары-Джаз Кыргызского Тянь-Шаня // Известия ВУЗов Кыргызстана. – 2019. – № 12. – С. 40–49.
- Михайлова Н. Н., Комаров И. И. Ледниковые землетрясения Центрального Тянь-Шаня / Н.Н. Михайлова, И.И. Комаров // Вестник НЯЦ РК. – 2009. – Вып. 3. – С. 120–126.
- Асминг В. Э., Федоров А. В., Прокудина А. В., Евтюгина З. А. Автоматическая система мониторинга региональной сейсмичности NSDL. Принципы построения и некоторые результаты использования // Современные методы обработки и интерпретации сейсмологических данных. Материалы XII Международной сейсмологической школы / Отв. ред. А. А. Маловичко. – Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН. – 2017. – С. 33–36.
- Михайлова Н. Н., Неверова Н. П. Калибровочная функция $\sigma(\Delta)$ для определения *MPVA* землетрясений Северного Тянь-Шаня // Комплексные исследования на Алма-Атинском прогностическом полигоне. – Алма-Ата: Наука. – 1986. – С. 41–48.

11. Раутиан Т. Г. Об определении энергии землетрясений на расстоянии до 3000 км // Экспериментальная сейсмика. (Труды ИФЗ АН СССР). – М.: Наука. – 1964. – № 32 (199). – С. 88–93.

REFERENCES

- Ekström G., M. Nettles and G. A. Abers Glacial earthquakes // Science. – 2003, – Vol. 302 (5645). – P. 622–624. <https://doi.org/10.1126/science.1088057>
- Ekström G., M. Nettles and V. C. Tsai Seasonality and increasing frequency of Greenland glacial earthquakes // Science. – 2006. – Vol. 311 (5768). – P. 1756–1758. <https://doi.org/10.1126/science.1122112>
- E. Podolsky, F. Walter. Cryoseismology // Reviews of Geophysics. – 2016. – P. 708–758. <https://doi.org/10.1002/2016RG000526>
- A. V. Fedorov, V. E. Asming. Nizkochastotnye zemletryaseniya arhipelaga Shpitsbergen // Kompleksnye issledovaniya prirody Shpitsbergena // Materialy mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii. Murmansk, 1–3 noyabrya, 2012 g. – Moscow, – 2012. – Issue 11. – P. 249–253.
- Kanao, M. A Decade of Advances in Cryoseismology // Polar Seismology. – 2018a – Advances and Impact. IntechOpen.
- Kanao, M. (2018b). A New Trend in Cryoseismology: A Proxy for Detecting the Polar Surface Environment // Polar Seismology. – 2018b. – Advances and Impact, 75.
- Usupaev Sh. E., Asming V. E., Sharshabaev A. K., Altynbek uulu T., Rakhmatilla uulu Z., Anarkulov B. A. O zemletryaseniyaх glyatsiotektonicheskogo kharaktera gornyykh stran na primere lednika Engilchek v basseynе reki Sary-Dzhaz Kyrgyzskogo Tyan'-Shanya // Izvestiya VUZov Kyrgyzstana. – 2019. – Vol. 12. – P. 40–49.
- Mikhaylova N. N., Komarov I. I. Glacial earthquakes of the central Tian-Shan / N.N. Mikhaylova, I.I. Komarov // NNC RK Bulletin. – 2009. – Issue 3. – P. 120–126. (In Russ.)
- Asming V. E., Fedorov A. V., Prokudina A. V., Evtyugina Z. A. Avtomaticheskaya sistema monitoringa regional'noy seysmichnosti NSDL. Printsipy postroeniya i nekotorye rezul'taty ispol'zovaniya // Sovremennyye metody obrabotki i interpretatsii seysmologicheskikh dannykh. Materialy XII Mezhdunarodnoy seysmologicheskoy shkoly / Otv. red. A. A. Malovichko. – Obninsk: FITs EGS RAN. – 2017. – P. 33–36.
- Mikhaylova N. N., Neverova N. P. Kalibrovochnaya funktsiya $\sigma(\Delta)$ dlya opredeleniya MPVA zemletryaseniya Severnogo Tyan'-Shanya // Kompleksnye issledovaniya na Alma-Atinskom prognosticheskom poligone. – Alma-Ata: Nauka. – 1986. – P. 41–48.
- Rautian T. G. Ob opredelenii energii zemletryaseniya na rasstoyanii do 3000 km // Eksperimental'naya seysmika. (Trudy IFZ AN SSSR). – Moscow: Nauka. – 1964. – Vol. 32 (199). – P. 88–93.

БИІК ТЯНЬ-ШАНЬДАҒЫ МҰЗДЫҚ ПРОЦЕСТЕРІН СЕЙСМОЛОГИЯЛЫҚ ЗЕРТТЕУ

А. Е. Шокпарбай*, Н. Н. Михайлова

ҚР ҰЯО РМК «Геофизикалық зерттеулер институты» филиалы, Курчатов, Қазақстан

** Байланыс үшін E-mail: shokparbai@list.ru*

Соңғы жылдары криосейсмология мұздықтардың динамикасын және олардың климаттық өзгерістермен өзара әрекеттесуін зерттеуге жаңа мүмкіндіктер бере отырып, зерттеудің маңызды бағытына айналды. Сейсмология мен гляциологияны біріктіретін бұл пәнаралық ғылым криосферадағы процестерді талдауға жаңа перспективалар ашады. 2023 жылы Қазақстан Республикасының Ұлттық ядролық орталығында "Климаттық өзгерістерді бағалау үшін ядролық, сейсмикалық және инфрадыбыстық әдістерді қолдану" нысаналы қаржыландыру бағдарламасы (НҚБ) шеңберінде Тянь-Шань мұздықтарын сейсмикалық және инфрадыбыс әдістермен зерттеу басталды. Биік Тянь-Шаньның ауқымды мұздықтарынан 70–150 км қашықтықта Қазақстан аумағында үш уақытша сейсмикалық және инфрадыбыстық станциялар орнатылды. Мұздықтардан 130 және 160 км қашықтықта орналасқан екі стационарлық станцияның деректері қосымша пайдаланылды: Қазақстан Республикасы Төтенше жағдайлар министрлігінің сейсмологиялық байқау және зерттеулер ұлттық ғылыми орталығының (ҚР ТЖМ СБЗҰО) құрамына кіретін Шалкөде станциясы (130 км) және Қазақстан Республикасы Ұлттық ядролық орталығының Геофизикалық зерттеулер институтына (ҚР ҰЯО ГЗИ) тиесілі Подгорное станциясы (160 км). Жартас негіздеріне орналастырылған бұл станциялар әлсіз мұздық белсенділік сигналдарын тіркеуде жоғары тиімділікті көрсетті. Зерттеулер мұздық процестерді және олардың климаттың өзгеруімен байланысын талдау үшін криосейсмологиялық тәсілдердің маңыздылығын растайды.

Түйінді сөздер: мұздық жер сілкінісі, Тянь-Шань, криосейсмология, энергетикалық класс, магнитуда, сейсмикалық станциялар, мониторинг.

SEISMOLOGICAL STUDIES OF GLACIAL PROCESSES IN THE HIGH-ALTITUDE TIEN SHAN

A. E. Shokparbai^{*}, N. N. Mikhailova

Branch “Institute of Geophysical Research” RSE NNC RK, Kurchatov, Kazakhstan

** E-mail for contacts: shokparbai@list.ru*

In recent years, cryoseismology has become an important area of research, providing new opportunities to study the dynamics of glaciers and their interaction with climate change. This interdisciplinary science, combining seismology and glaciology, opens up new perspectives for the analysis of processes in the cryosphere. In 2023, research of the Tien Shan glaciers using seismic and infrasound methods began at the National Nuclear Center of the Republic of Kazakhstan within the framework of the Targeted Financing Program (TFP) “Application of nuclear, seismic and infrasound methods for assessing climate change.” Three temporary seismic and infrasound stations have been installed in Kazakhstan, 70–150 km from the large-scale glaciers of the high-altitude Tien Shan. Additionally, data from two stationary stations located at distances of 130 and 160 km from glaciers were used: the Shalkode station (130 km), which is part of the network of the National Scientific Center for Seismic Observations and Research of the Ministry of Emergency Situations of the Republic of Kazakhstan (NSCSOR MES RK), and the Podgornoye station (160 km), owned by the Institute of Geophysical Research The National Nuclear Center of the Republic of Kazakhstan (IGR NNC RK). These stations, located on rocky foundations, have demonstrated high efficiency in recording weak signals of glacial activity. Research confirms the importance of cryoseismological approaches for analyzing glacial processes and their relationship to climate change.

Keywords: *glacial earthquakes, Tien Shan, cryoseismology, energy class, magnitude, seismic stations, monitoring.*

<https://doi.org/10.52676/1729-7885-2025-1-64-71>

УДК: 621.762.4

МАГНИЙ НЕГІЗІНДЕГІ ҰНТАҚ ҚОСПАСЫНЫҢ МОРФОЛОГИЯСЫНА МЕХАНОСИНТЕЗ ПАРАМЕТРЛЕРІНІҢ ӘСЕРІН БАҒАЛАУ

**Н. М. Мухамедова, А. Ж. Миниязов, О. Өкен*, Ж. Н. Оспанова,
А. А. Сабыртаева, К. С. Шайкиева, Т. Д. Ахмеди**

ҚР ҰЯО РМҚ «Атом энергиясы институты» филиалы, Қурчатов, Қазақстан

** Байланыс үшін E-mail: oken@nnc.kz*

Бұл мақалада Mg-Ni-Ce жүйесінің ұнтақ құрамындағы фазалық және морфологиялық өзгерістердің механикалық синтез параметрлеріне тәуелділігі талданады. Механосинтез процесі барысында материалдың құрылымдық сипаттамаларына үдеу мен ұзақтық параметрлерінен бөлек, ұнтақ пен ұсатқыш шарлардың қатынасы да айтарлықтай әсер ететіні анықталды. Микроскопиялық талдау нәтижелері көрсеткендей, ұнтақ пен шарлардың 1:10 қатынасында синтезделген қоспалардағы бөлшектердің орташа мөлшері 13,76 мкм құрайды. Ал 1:30 қатынасы қолданылған жағдайда бөлшектердің мөлшері 7,59 мкм-ге дейін кішірейеді. Барлық үлгілерде негізгі фаза магний болып табылатыны анықталды. Алайда 1:30 қатынасында MgNi фазасының гексагоналды кристалдық торының қалыптасуы және CeNi фазасының түзілуі байқалады.

Түйін сөздер: *механосинтез, механикалық белсендіру, ұнтақ қоспасы, сутегі, магний.*

КІРІСПЕ

Басқа баламалы энергия көздерімен қатар, сутегі энергиясын қолдану перспективалары жоғары. Сутегі энергиясын дамыту парниктік газдардың шығарындыларын азайтуға, сондай-ақ энергетикалық және экологиялық қауіпсіздікті қамтамасыз ету бойынша негізгі міндеттерді шешуге ықпал етеді [1]. Осы салада құзыреті мен инфрақұрылымы бар елдер үшін сутегі энергетикасы энергетикалық қауіпсіздікті қамтамасыз етудің негізі бола алады. Сутегі энергетикасының белсенді дамуы энергетика саласында жаңа әлемдік нарықты қалыптастырады.

ҚР Президенті Қасым-Жомарт Тоқаев өз сөзінде жаңартылатын энергия көздерін пайдаланудың басымдығын атап өтті. Оның айтуынша, Қазақстанда «жасыл» сутектің өнеркәсіптік кластерін құруға үлкен мүмкіндіктер бар. Елімізде бұл үшін қажетті ғылыми әлеует пен білікті мамандар бар [2–4]. Бұл сутегі технологияларын дамытудың жол картасы құрыла бастаған Қазақстандағы сутегі технологиялары мен сутегі нарығының дамуына жаңа серпін берді.

Сутегі жер бетіндегі ең кең таралған элемент болғанымен, оның еркін күйде болуы өте шектеулі [5]. Кез келген басқа тауар сияқты, сутегі де түпкілікті тұтынушының пайдалануы үшін өндірілуі, сақталуы және тасымалдануы керек [6]. Сутегіні сақтау және тасымалдау бүгінгі күннің ең өзекті мәселелерінің бірі болып табылады.

Қазіргі уақытта сутекті тиімді сақтаудың ең үлкен әлеуеті металл гидридтеріне негізделген қатты күйдегі сақтау жүйелерінде шоғырланған. Бұл жүйелер сутекті жоғары көлемдік және массалық тығыздықта сақтаумен қатар, салыстырмалы түрде төмен температура мен орташа қысымда сіңіру және десорбция процесін жүзеге асыруға мүмкіндік береді. Сонымен қатар, металл гидридтері химиялық тұрақтылықты, қайталама пайдалану мүмкіндігін және цикл-

дік тұрақтылықты қамтамасыз ете отырып, сутектің қауіпсіз сақталуын қамтамасыз етеді. Осы себепті, металл гидридтері сутекті энергия тасымалдаушысы ретінде кеңінен қолданудың перспективасы шешімі ретінде қарастырылады. Алайда, сутекті сақтау жүйелерінің техникалық-экономикалық тиімділігі әлі жүзеге асқан жоқ, себебі қолданыстағы металл гидридтерінің ешқайсысы практикалық қолданудың негізгі критерийлерін қанағаттандырмайды [7–8].

Сутегі құрамының жоғары тығыздығына байланысты сутекті химиялық байланысқан түрде сақтауға арналған материалдар бүгінгі күнге дейін кеңінен зерттелуде. Осындай материалдардың қатарына NaAlH_4 , AlH_3 , LiBH_4 , $\text{Mg}(\text{BH}_4)_2$, аммиакоборан (NH_3BH_3), амидтік жүйелер, Li_2NH , Li_3NH , LiAlH_4 , MgH_2 және NaBH_4 сияқты шамамен 6–8% (масс.) мөлшеріне дейін жетуге қабілетті металл гидридтері жатады [9–16].

Бүгінгі таңда сутекті сақтаудың келешегі зор әдістерінің бірі – магний (Mg) негізіндегі қосылыстар. Бұл қосылыстар 7,6%-ға дейінгі жоғары сыйымдылыққа, қайта пайдалану мүмкіндігіне, қоршаған ортаға қауіпсіздігіне және Кларк санының жоғары сипаттамаларына ие [17]. Алайда, оның практикалық қолданылуы екі негізгі фактормен шектеледі: біріншіден, гидридтік фазаның жоғары термодинамикалық тұрақтылығы, бұл сутектің сіңірілу және десорбциялану кинетикасының жеткілікті жылдамдығын қамтамасыз ету үшін жоғары температураны талап етеді; екіншіден, атмосфералық ластанушы заттардың әсеріне төзімділігінің төмендігі, бұл материалдың сорбциялық қасиеттерінің тез нашарлауына әкеледі [18–21].

Бірқатар зерттеулерде [22–24] никель (Ni) Mg негізіндегі қорытпаларда тиімді каталитикалық элемент екені атап өтілген. Mg–Ni қорытпаларын сутекпен қанықтыру кезінде әртүрлі сутекқұрамды фаза-

лар, соның ішінде MgH_2 және Mg_2NiH_4 гидридтік қосылыстары түзіледі. Mg_2NiH_4 таза Mg_2Ni -мен салыстырғанда сутекті сіңіру және десорбциялау кинетикасы жағынан айтарлықтай тиімді екені анықталған.

Сонымен қатар, сирек жер металдарын (RE) Mg-Ni жүйесіне енгізу (Mg-Ni-RE) сутекті сақтау қасиеттерін жақсартады. Бұл әсер материалдың жоғары дисперстік құрылымымен және никель мен сирек жер элементтері арасындағы синергетикалық өзара әрекеттесумен түсіндіріледі. Нанокұрылымдандыру осы процесте маңызды рөл атқарады: меншікті беттің ұлғаюы және кристалдық шекаралар тығыздығының артуы магний мен сутек арасындағы байланыс энергиясын тұрақсыздандырады. Соның нәтижесінде MgH_2 десорбция температурасы төмендеп, сутекті сақтау кинетикасы жақсартады [25–26].

Осындай материалдарды алудың кең таралған әдістерінің бірі – механикалық синтез (механосинтез) әдісі. Бұл процес жоғары энергиялы планетарлық диірмендерде бастапқы ұнтақтарды легирлеуші элементтермен белгілі уақыт бойы араластыру арқылы жүзеге асады. Механосинтез нәтижесінде берілген химиялық құрамы мен микроқұрылымы бар наноөлшемді бөлшектер түзіледі [27–29].

Сутегі жинақталу кинетикасын жақсарту мақсатында механикалық ұнтақтаудың негізгі параметрлері (ұнтақтау уақыты, айналу жылдамдығы, шар-ұнтақ қатынасы, атмосфера) оңтайландырылуы маңызды рөл атқарады. Оптималды ұнтақтау режимі сутегі десорбциясының белсендіру энергиясын айтарлықтай төмендетіп, сутегі жинақтау процестерін айтарлықтай жылдамдата алады. Осылайша, механикалық өңдеу арқылы Mg негізіндегі сутегі жинақтаушы материалдардың құрылымы мен фазалық күйін өзгерту олардың сутегіні сақтау қабілетін жақсартады [33].

Осы зерттеудің мақсаты – сутекті сақтау және тасымалдауға арналған функционалдық материалдарды әзірлеу үшін перспективалы Mg-Ni-Ce жүйесін механосинтездеудің оңтайлы параметрлерін қарастырып, ұнтақ құрылымына тигізетін әсерін зерттеу. Бұл өз кезегінде интерметалл қосылыстарын әрі қарай тереңірек зерттеуге және оларды тиімді пайдалануға мүмкіндік береді.

ЗЕРТТЕУ ӘДІСІ

Зерттеу объектісі Mg, Ni және Ce металл ұнтақтары (жеткізуші: Суойи, Қытай). Ұнтақ қоспаларының құрамын таңдау интерметаллидтердің түзілуіне легирлеуші элементтердің әсерін зерттеуге арналған бұрын жүргізілген теориялық талдауға негізделді. Бастапқы ұнтақтардың сипаттамалары №1 кестеде көрсетілген.

Бірінші кезеңде ұнтақтарды механикалық белсендіру жеке орындалды. Бұл процес ұнтақ бөлшектерінің меншікті беттік ауданын ұлғайту мақсатында жүзеге асырылды. Екінші кезеңде ұнтақ қоспаларын планетарлық диірменде әртүрлі параметрлермен механосинтездеу бойынша тәжірибелер жүргізілді. Механикалық белсендіру және механосинтез процесі Retsch PM100 планетарлық диірменінде жүзеге асырылды.

Тәжірибелер кезінде 1.4034 / AISI 420 маркалы тот баспайтын болаттан жасалған диаметрі 5 мм ұнтақтау шарлары, көлемі 250 мл ұнтақтау ыдысы пайдаланылды. Қажетті ұсақтыққа жетуге оңтайлы шар өлшемін таңдау үшін әдетте шамамен 1000 көбейткіші пайдаланылады. Бұл көбейткіш бастапқы бөлшек өлшемі мен соңғы қажетті бөлшек өлшемі арасындағы қатынасты көрсетеді және ұнтақтау тиімділігін қамтамасыз етеді. Осыған байланысты, қолданылған планетарлық диірмен үлгісінде ұнтақтаудың максималды қол жеткізу дәрежесі 5 мкм дейін болғандықтан, ең қолайлы шар өлшемі 5 мм болып табылады. Ұнтақтау гарнитурасының сипаттамалары 2-кестеде келтірілген.

Тәжірибелер барысында ұнтақ массасы мен ұнтақтау шарларының массалық қатынасы 1:10 және 1:30, ал ұнтақтау уақыты 5 және 10 сағат аралығында таңдалды. Диірменнің айналу жылдамдығы 350 және 450 айн/мин деңгейінде белгіленді. Әрбір ұнтақтау кезеңінде бөлшектердің біркелкі дисперсиясын қамтамасыз ету және олардың агломерациясын болдырмау мақсатында айналу бағыты әр сағат сайын өзгертілді. Бұл тәсіл ұнтақ қоспаларының біркелкі ұнтақталуын қамтамасыз етіп, механосинтез процесінің тиімділігін арттырды.

1-кесте. Бастапқы ұнтақтардың сипаттамасы

№ р/н	Атауы	Маркасы	Тазалығы, %	Бөлшектердің мөлшері, мкм
1	Магний ұнтағы	МПФ-3	99	120–180
2	Церий металл ұнтағы	–	99,99	70
3	Никель карбонил ұнтағы	ПНК-УТ3	99,9	20

2-кесте. Ұнтақтау гарнитурасының сипаттамалары

Позициялар атауы	Сипаттамасы	Материалдың қаттылығы	Химиялық құрамы, %
Ұнтақтау ыдысы	көлемі – 250 мл	48–50 HRC	Fe (82,925), Cr (14,5), C (0,5), Mn (1), Si (1), P (0,045), S (0,03)
Ұнтақтаушы шарлар	диаметр – 5 мм		

**МАГНИЙ НЕГІЗІНДЕГІ ҰНТАҚ ҚОСПАСЫНЫҢ МОРФОЛОГИЯСЫНА МЕХАНОСИНТЕЗ
ПАРАМЕТРЛЕРІНІҢ ӨСЕРІН БАҒАЛАУ**

3-кесте. Тәжірибе параметрлері

Құрамдық мөлшері (масс.%)	Ұнтақтаушы шарлардың ұнтақ қоспасына қатынасы	Тәжірибе өткізу уақыты, сағ	Үдеу, айн/мин	Ұнтақ массасы, г	Ортасы	Қысым, кПа	Стеарин қышқылы, г	
Механикалық белсендіру								
Mg	1:20	1	200	19,25	аргон	5	0,57	
Ni				19,25				
Ce				19,25				
Механикалық синтез								
Mg-3%Ni-2%Ce	1:10	5	350	38,5	аргон	5	0,57	
			450					
		10	350					
			450					
	1:30	5	350	12,8				0,57
			450					
10		350						
		450						

Ұнтақтарды дайындау және өлшеу, сондай-ақ ұнтақ пен шарлар қоспасын ұнтақтау ыдысына салу вакуумдық қолғап қорабында (GVB-3C), аргон атмосферасында жүргізілді. Ұнтақ мөлшері планетарлық диірменнің сипаттамалары мен мүмкіндіктерін ескере отырып есептелді: Ұнтақтау ыдыс көлемінің 1/3 бөлігін толтыру, ұнтақтың массасы қолданылатын ұнтақтау шарларының санын ескере отырып анықталды. Барлық жүргізілген эксперименттерде ұнтақтау шарларының бірдей мөлшері – салмағы 385 грамм, ал көлемі 80–83 мл, бұл шамамен диірмен ыдысының 1/3 бөлігіне сәйкес келді. Ұнтақ қоспасының мөлшері ұнтақтау шарлары мен қоспаның таңдалған қатынасына байланысты анықталды. Жүргізілген тәжірибелердің параметрлері 3-кестеде сипатталған.

Механикалық белсендіру ден кейін Fritsch ANALYSETTE 3 PRO вибрациялық електің көмегімен бөлшектердің өлшемдік құрамына талдау жүргізілді. Бұл зерттеу барысында құрылғының үздіксіз (тұрақты) елеу режимі қолданылды, бұл бөлшектердің өлшемдік таралуын жоғары дәлдікпен анықтауға мүмкіндік берді. Электің процесі кезінде амплитуда 1,5 мм деңгейінде орнатылды, бұл бөлшектердің тиімді еленуін қамтамасыз етті және олардың фракциялық құрамын нақты бағалауға септігін тигізді. Талдау жалпы 30 минут бойы жүргізілді, бұл бөлшектердің өлшемдері бойынша сенімді және қайталанатын нәтижелер алуға мүмкіндік берді.

Бұдан кейін ұнтақтар механосинтез процесі 3-кестеде көрсетілген режимдерге сәйкес жүргізілді.

Ұнтақ пен ұнтақтаушы шарлардың 1:10 және 1:30 қатынасында алынған 8 ұнтақ қоспасы энергия-дисперсиялық спектрлік талдау қосымшасы бар Hitachi TM4000plus сканерлеуші электрондық микроскоптың көмегімен топографиялық контраст (Topographical contrast) режимінде зерттелді.

Механосинтезден кейін алынған үлгілердің рентгендік дифракциялық талдауы X'Pert PRO дифрак-

тометрдің көмегімен жүргізілді. Талдау барысында Cu-K α сәулеленуі қолданылды, генератор параметрлері 40 кВ кернеу және 30 мА ток мәндерінде орнатылды. Өлшеу кезінде бекітілген ені 0,75 мм және бұрыштық алшақтауы 0,478° болатын саңылау пайдаланылды. Дифрактограммаларды тіркеу 20–90° 2 θ бұрыштық диапазонында жүзеге асырылды, сканерлеу қадамының өлшемі 0,020° 2 θ , ал әрбір қадамдағы экспозиция уақыты 0,5 с құрады. Алынған рентгендік дифрактограммаларды фазалық сәйкестендіру үшін Crystallography Open Database (COD) және PDF-2 ICDD Release 2004 дерекқорлары қолданылды. Кристаллиттердің өлшемі Шеррер теңдеуін пайдалана отырып, математикалық есептеу әдісімен анықталды:

$$D = \frac{K\lambda}{\beta \cos\theta} \quad (1)$$

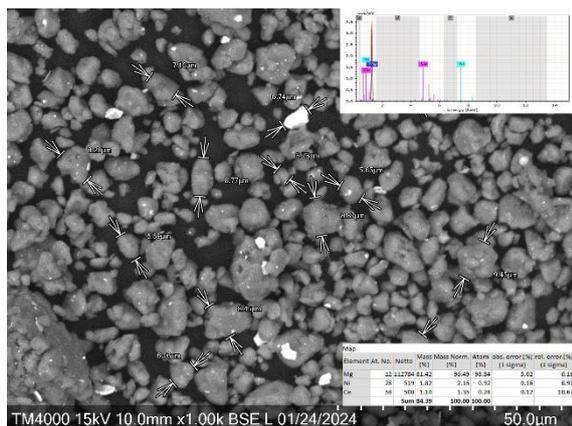
Мұнда D – кристаллит өлшемі; K – пішін коэффициенті; λ – рентген сәулесінің толқын ұзындығы; β – шыңның жартылай биіктіктегі толық ені (FWHM); ал θ – дифракция бұрышы. Мұндағы пиктердің ені «HighScore» бағдарламалық жасақтамасында Гаусс функциясын аппроксимациялау арқылы анықталды.

НӘТИЖЕЛЕР

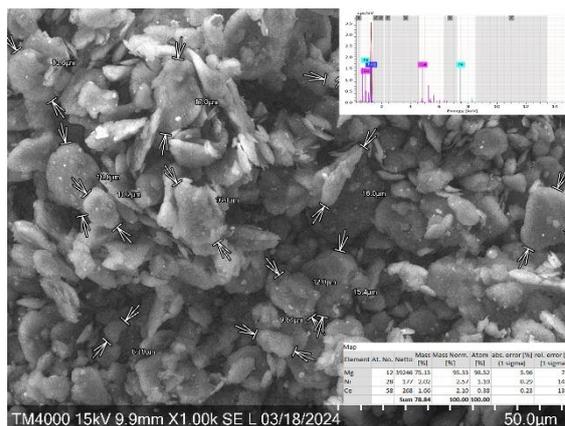
1-суретте механикалық белсендіруден кейін Fritsch ANALYSETTE 3 PRO вибрациялық электің көмегімен алынған бөлшектердің өлшемдік құрамының таралуына жүргізілген талдау нәтижелері гистограмма түрінде көрсетілген.

Жүргізілген зерттеулердің нәтижесінде бастапқы ұнтақ қоспасының бөлшектері кең диапазонда таралғанымен, механикалық белсендіру процесі олардың дисперсиясын едәуір арттырғаны анықталды. Бұл өз кезегінде бөлшектердің орташа мөлшерін азайтып, олардың таралуының біркелкілігіне оң әсер етті. Әртүрлі элементтердің (Mg, Ni, Ce) бөлшектері әртүрлі мөлшерлік таралу сипаттамаларына ие болғанымен,

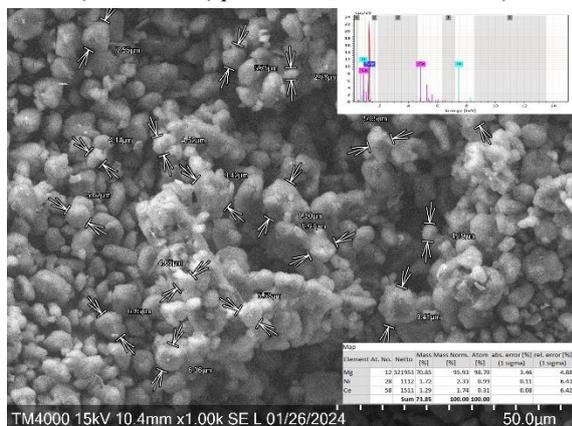
МАГНИЙ НЕГІЗІНДЕГІ ҰНТАҚ ҚОСПАСЫНЫҢ МОРФОЛОГИЯСЫНА МЕХАНОСИНТЕЗ ПАРАМЕТРЛЕРІНІҢ ӨСЕРІН БАҒАЛАУ



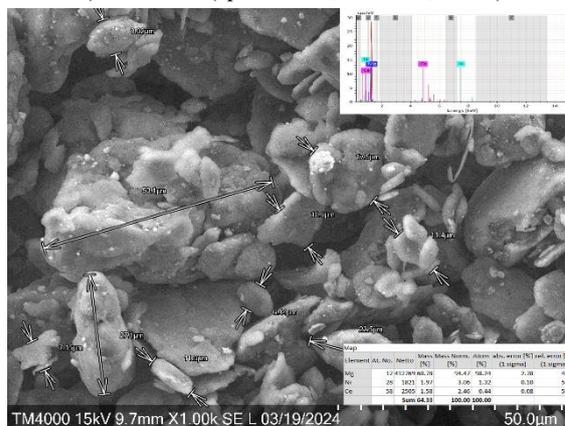
д) №3 қоспа (арақат. 1:30, 350 айн., 10 сағ.)



е) №7 қоспа (арақат. 1:10, 350 айн., 5 сағ.)



ж) №4 қоспа (арақат. 1:30, 450 айн., 10 сағ.)

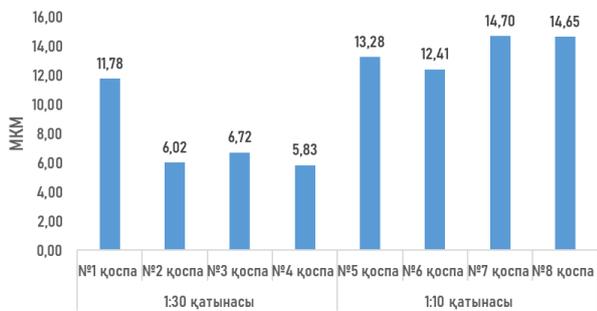


з) №8 қоспа (арақат. 1:10, 450 айн., 10 сағ.)

2-сурет (жалғасы). МС кейін ұнтақ қоспаларының топографиялық контраст режимінде алынған СЭМ кескіндері

Әртүрлі арақатынастарда алынған қоспалардағы ұнтақ бөлшектерінің пішіні бойынша өлшемдеріне жүргізілген салыстырмалы талдау ұнтақтардың ең үлкен дисперсиясына шарлар мен қоспалардың үлкен қатынасы бар (1:30) үлгілерде қол жеткізілетінін көрсетеді.

Механосинтез Mg-Ni-Ce жүйесінің үлгілерінің фазалық құрамында елеулі өзгерістерге қол жеткізуге мүмкіндік берді. 4-суретте ұнтақ пен ұнтақтаушы шарлардың 1:10 (а) және 1:30 (б) қатынасында алынған қоспалардан түсірілген дифрактограммалары көрсетілген.



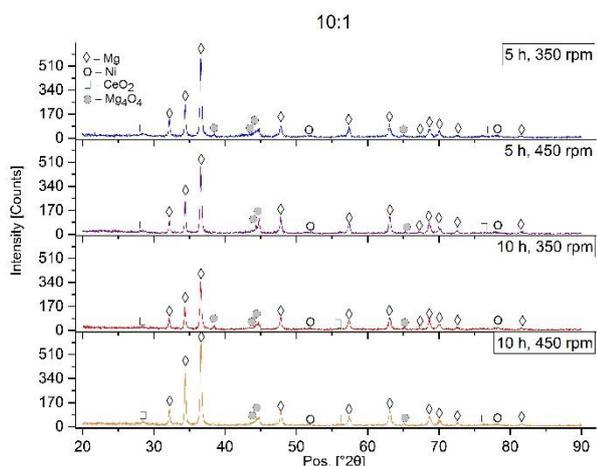
3-сурет. Алынған ұнтақ қоспаларының бөлшектерінің орташа мөлшері (мкм)

Рентгендік дифрактограммалардың талдау нәтижелері бойынша барлық қоспалардың фазалық құрамының негізі алтыбұрышты кристалдық тормен сипатталатын, кеңістік тобы P-63/mmc, тор параметрлері $a = b = 3,212 \text{ \AA}$, $c = 5,215 \text{ \AA}$ болатын Mg фазасы болып табылады.

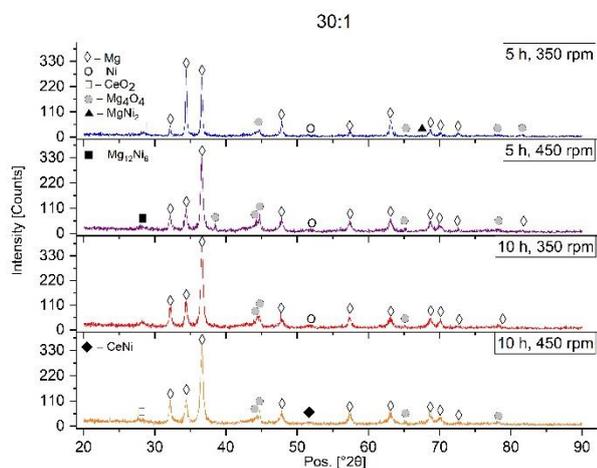
Ұнтақтау шарларының 1:10 қатынасында бастапқы Mg және Ni фазалары сақталып, жаңа интерметалдық қосылыстардың түзілуі байқалмайды. Бұл ұнтақтау шарларының саны аз болғандықтан, механосинтез процесі кезінде жүйеге берілетін механикалық энергия жеткіліксіз болғанын көрсетеді.

Ұнтақтаушы шарлар мен ұнтақтың 1:30 қатынасында алынған қоспаларда интерметалдық фазалардың (MgNi_2 , $\text{Mg}_{12}\text{Ni}_6$, CeNi) қарқынды түзілуі байқалады. Яғни, ұнтақтау шарларының көп мөлшері процестің белсенді жүруіне және жаңа фазалардың қалыптасуына ықпал еткен. Бұл жоғары механикалық әсердің арқасында фазалық өзгерістердің күшеюін көрсетеді.

Шеррдің математикалық есептеу әдісін қолдана отырып (1), негізгі фазалардың барлық кристаллиттерінің орташа өлшемі 60 нм құрайтыны анықталды.



а) ұнтақтаушы шарлар мен ұнтақтың 1:10 қатынасында алынған қоспалар



б) ұнтақтаушы шарлар мен ұнтақтың 1:30 қатынасында алынған қоспалар

4-сурет. Алынған қоспалардың дифрактограммалары

Механосинтез кезіндегі айналу жылдамдығының өзгеруі шындалдың қарқындылығының төмендеуіне және олардың кеңеюіне айтарлықтай әсер етеді. Бұл құбылыс ұнтақ бөлшектеріне берілетін механикалық энергияның ұлғаюымен және синтез процесі кезіндегі үйкеліс әсерінің күшеюімен түсіндіріледі.

Сонымен қатар, Се оксидтерінің болуы, әдеби деректерге сәйкес [34], Mg оксидтерінің беткі концентрациясын төмендетуі тиіс және бұл микроструктуралық өзгерістер арқылы ауадағы оттегімен әрекеттесу кезінде материалдың тотығуға төзімділігінің жақсарғанын көрсетеді.

Қорытынды

Mg-Ni-Ce ұнтақ қоспасының морфологиясына механосинтез параметрлерінің әсерін бағалау мақсатында негізгі факторларға талдау жүргізілді. Зерттеу нәтижесінде механосинтездің басты параметрлері – үдеу мен ұзақтығы анықталды. Сонымен қатар, ұнтақ пен ұнтақтаушы шарлардың қатынасының жаңа

интерметалл фазаларының түзілуіне айтарлықтай ықпал ететіні көрсетті.

Микроскопиялық талдау нәтижелері ұнтақтау шарларының 1:30 қатынасында синтезделген қоспалардағы бөлшектердің орташа өлшемі 7,59 мкм, ал 1:10 қатынасында алынған қоспаларда 13,76 мкм екенін анықтады.

Жүргізілген морфологиялық талдау ең жоғары дисперсияға қол жеткізу үшін оңтайлы параметрлер № 4 қоспа параметрлері екенін көрсетті. Жалпы зерттеу нәтижелері бойынша ұнтақтау үшін ең тиімді қатынас 1:30 екені анықталды.

Алғыс

Бұл жұмыс AP19574566 «Mg-Ni-Ce негізіндегі сутегі сақтау материалдарын жасау» тақырыбы бойынша, 2023–2025 жылдарға арналған ғылыми және ғылыми-техникалық жобалар бойынша жас ғалымдарға гранттық қаржыландыру жобасы шеңберінде жүзеге асырылды.

Авторлар Сутегі энергетикасы саласындағы технологиялық құзыреттер орталығының ұжымына зерттеуді жүргізуге көрсеткен қолдаулары мен көмектері үшін шынайы алғыс білдіреді.

ӘДЕБИЕТТЕР / REFERENCES

1. Arto I., Capellán-Pérez I., Lago R., Bueno G., Bermejo R. The energy requirements of a developed world // Energy Sustain Dev. – 2016. – Vol. 33. – P. 1–13.
2. Развитие водородной энергетики в Казахстане: встреча Токаева с главами немецкой Svevind Group // <https://kazpravda.kz/n/razvitie-vodorodnoy-energetiki-v-kazahstane-tokaev-vstretilsya-s-glavoy-nemetskoy-svevind-group/> (дата обращения 17.10.2022). [Development of Hydrogen Energy in Kazakhstan: Tokayev Meets with Head of German Svevind Group // <https://kazpravda.kz/n/razvitie-vodorodnoy-energetiki-v-kazahstane-tokaev-vstretilsya-s-glavoy-nemetskoy-svevind-group/>]
3. Предложение Токаева лидерам тюркских стран о создании международного консорциума по развитию водородной энергетики // <https://informburo.kz/novosti/tokaev-vystupil-na-sammite-soveta-sotrudnichestva-tyurkskih-gosudarstv> (дата обращения 17.10.2022). [Predlozhenie Tokaeva lideram tyurkskikh stran o sozdaniy mezhduнародного konsortsiuma po razvitiyu vodorodnoy energetiki (In Russ.)]
4. Совещание главы государства по вопросам развития электроэнергетической отрасли // <https://akorda.kz/ru/glava-gosudarstva-provel-soveshchanie-po-voprosam-razvitiya-elektroenergeticheskoy-otrasli-2641240> (дата обращения 17.10.2022). [The Head of State held a meeting on the development of the electric power industry // <https://akorda.kz/en/the-head-of-state-held-a-meeting-on-the-development-of-the-electric-power-industry-2641630>]
5. Wiedenhofer D., Lenzen M., Steinberger J. K. Energy requirements of consumption: Urban form, climatic and socio-economic factors, rebounds and their policy

- implications // *Energy policy*. – 2013. – Vol. 63. – P. 696–707.
6. Mesarić P., Krajcar S. Home demand side management integrated with electric vehicles and renewable energy sources // *Energy and Buildings*. – 2015. – Vol. 108. – P. 1–9.
 7. Jacobson M. Z. Review of solutions to global warming, air pollution, and energy security // *Energy & Environmental Science*. – 2009. – Vol. 2. – No. 2. – Vol. 148–173.
 8. Acar C., Dincer I. Review and evaluation of hydrogen production options for better environment // *Journal of cleaner production*. – 2019. – Vol. 218. – P. 835–849.
 9. Niaz S., Manzoor T., Pandith A. H. Hydrogen storage: Materials, methods and perspectives // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. – 2015. – Vol. 50. – P. 457–469.
 10. Ley, M. B., Jepsen, L. H., Lee, Y.-S., Cho, Y. W., Bellostavon Colbe, J. M., Dornheim, M., et al. Complex hydrides for hydrogen storage – new perspectives // *Materials Today*. – 2014. – Vol. 17(3). – P. 122–128.
 11. Shin-ichi Orimo, Yuko Nakamori, Jennifer R. Eliseo, Andreas Züttel, and Craig M. Jensen. Complex Hydrides for Hydrogen Storage // *Chemical reviews*. – 2007. – Vol. 107. – P. 4111–4132.
 12. Jiuyi Zhu, Yuchen Mao, Hui Wang, Jiangwen Liu, Liuzhang Ouyang, and Min Zhu. Reaction Route Optimized LiBH₄ for High Reversible Capacity Hydrogen Storage by Tunable Surface-Modified AlN // *ACS Appl. Energy Mater*. – 2020. – Vol. 3(12). – P. 1964–11973.
 13. Zhenglong Li, et al. Catalyzed LiBH₄ Hydrogen Storage System with In Situ Introduced Li₃BO₃ and V for Enhanced Dehydrogenation and Hydrogenation Kinetics as Well as High Cycling Stability // *ACS Appl. Energy Mater*. – 2022. – Vol. 5(1). – P. 1226–1234.
 14. Haizhen Liu et al. Aluminum hydride for solid-state hydrogen storage: Structure, synthesis, thermodynamics, kinetics, and regeneration // *Journal of Energy Chemistry*. – 2021. – Vol. 52. – P. 428–440.
 15. Лукашев Р.В. Водород-аккумулирующие и водород-генерирующие системы MgH₂-C и AlH₃-C // *Альтернативная энергетика и экология*. – 2008. – № 2(58). – С. 39-46. [Lukashov R.V. Vodorod-akkumuliruyushchie i vodorod-generiruyushchie sistemy MgH₂-C i AlH₃-S // *Альтернативная энергетика и экология*. – 2008. – No. 2(58). – P. 39–46. (In Russ.)]
 16. Kojima, Y. Hydrogen storage materials for hydrogen and energy carriers // *International Journal of Hydrogen Energy*. – 2019. – Vol. 44. – P. 18179–18192.
 17. J. Song, J. She, D. Chen, F. Pan. Latest research advances on magnesium and magnesium alloys worldwide // *Journal of Magnesium and Alloys*. – 2020. Vol. 8. – P. 1–41.
 18. Huang, C., Feng, Y., Wang, J., Liu, C., & Li, D. Effects of noble metal modification on the performance of LaNiO₃ catalyst for hydrogen production from ethanol steam reforming // *International Journal of Hydrogen Energy*. – 2019. – Vol. 44(22). – P. 11326–11337.
 19. Wang H., Lin, H. J., Cai, W. T., Ouyang, L. Z., Zhu, M. Tuning kinetics and thermodynamics of hydrogen storage in light metal element based systems – A review of recent progress // *Journal of Alloys and Compounds*. – 2016. Vol. 658. – P. 280–300.
<https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2015.10.090>
 20. Ding, Z., Li, Y., Lu, Y., et al. Tailoring MgH₂ for hydrogen storage through nanoengineering and catalysis // *Journal of Magnesium and Alloys*. – 2022. – Vol. 10, Issue 11. – P. 2946–2967.
<https://doi.org/10.1016/j.jma.2022.09.028>
 21. Li, Q., Lu, Y., Luo, Q., et al. Thermodynamics and kinetics of hydriding and dehydriding reactions in Mg-based hydrogen storage materials // *Journal of Magnesium and Alloys*. – 2021. – Vol. 9, Issue 6. – P. 1922–1941.
<https://doi.org/10.1016/j.jma.2021.10.002>
 22. Cong Peng, Yongtao Li, Qingan Zhang. Enhanced hydrogen desorption properties of MgH₂ by highly dispersed Ni: The role of in-situ hydrogenolysis of nickelocene in ball milling process // *Journal of Alloys and Compounds*. – 2022. – Vol. 900. – P. 163547.
<https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2021.163547>
 23. Lishuai Xie, Jinshan Li, Tiebang Zhang, Hongchao Kou, De/hydrogenation kinetics against air exposure and microstructure evolution during hydrogen absorption/desorption of Mg-Ni-Ce alloys // *Renewable Energy*. – 2017. – Vol. 113. – P. 1399–1407.
<https://doi.org/10.1016/j.renene.2017.06.102>
 24. Lin, H.-J., Zhang, C., Wang, H., Ouyang, L., Zhu, Y., Li, L., et al. Controlling nanocrystallization and hydrogen storage property of Mg-based amorphous alloy via a gas-solid reaction // *Journal of Alloys and Compounds*. – 2016. – Vol. 685. – P. 272–277.
<https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2016.05.286>
 25. Varin R.A, Zbroniec L, Polanski M, Bystrzycki J. A review of recent advances on the effects of microstructural refinement and nano-catalytic additives on the hydrogen storage properties of metal and complex hydrides // *Energies*. – 2011. – Vol. 4. – P. 1–25.
 26. Huot, J., Ravnsbæk, D. B., Zhang, J., Cuevas, F., Latroche, M., & Jensen, T. R. Mechanochemical synthesis of hydrogen storage materials // *Progress in Materials Science*. – 2013. – Vol. 58(1). – P. 30–75.
<https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2012.07.001>
 27. Kozhakhmetov, Y., Skakov, M., Wieleba, W., Sherzod, K., Mukhamedova, N. Evolution of intermetallic compounds in Ti-Al-Nb system by the action of mechanoactivation and spark plasma sintering // *AIMS Materials Science*. – 2020. – Vol. 7 (2). – No. 182. – P. 182–191.
 28. Floriano R. et al. Cold rolling of MgH₂ powders containing different additives // *Int. J. Hydrogen Energy*. Elsevier Ltd. – 2013. – Vol. 38 (36). – P. 16193–16198.
 29. Zhou C., Peng Y., Zhang Q. Growth kinetics of MgH₂ nanocrystallites prepared by ball milling // *Journal of Materials Science & Technology*. – 2020. – Vol. 50. – P. 178–183.
 30. Pukazhselvan D., Capurso G., Maddalena A., Lo Russo S., Fagg D.P. Hydrogen storage characteristics of magnesium impregnated on the porous channels of activated charcoal scaffold // *International journal of hydrogen energy*. – 2014. – Vol. 39. – No. 35. – P. 20045–20053.
 31. Rahmalina D. et al. The recent development on MgH₂ system by 16 wt% nickel addition and particle size reduction through ball milling: a noticeable hydrogen capacity up to 5 wt% at low temperature and pressure // *International Journal of Hydrogen Energy*. – 2020. – Vol. 45. – No. 53. – P. 29046–29058.
 32. Dornheim M. et al. Hydrogen storage in magnesium-based hydrides and hydride composites // *Scripta Materialia*. – 2007. – Vol. 56. – No. 10. – P. 841–846.

33. Xu, Y.; Li, Y.; Hou, Q.; Hao, Y.; Ding, Z. Ball Milling Innovations Advance Mg-Based Hydrogen Storage Materials Towards Practical Applications // Materials. – 2024. – Vol. 17. – P. 2510.
<https://doi.org/10.3390/ma17112510>

34. Chen X, Xie FQ, Ma TJ, et al. Microstructure evolution and mechanical properties of linear friction welded Ti₂AlNb alloy // Journal of Alloys and Compounds. – 2015. – Vol. 646. – P. 490–496.

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ПАРАМЕТРОВ МЕХАНОСИНТЕЗА НА МОРФОЛОГИЮ Порошковой смеси на основе магния

**Н. М. Мухамедова, А. Ж. Миниязов, О. Өкен*, Ж. Н. Оспанова,
А. А. Сабыртаева, К. С. Шайкиева, Т. Д. Ахмеди**

Филиал «Институт атомной энергии» РГП НЯЦ РК, Курчатов, Казахстан

** E-mail для контактов: oken@nnc.kz*

В настоящей статье представлен анализ зависимости фазовых и морфологических изменений в порошковой системе Mg-Ni-Ce от параметров механосинтеза. В процессе проведения механосинтеза, выявлено, что на изменения структурных характеристик материала, помимо параметров ускорения и продолжительности, значительное влияние оказывает соотношение порошка и измельчающих шаров. Результаты микроскопического анализа показали, что при соотношении порошка и шаров 1:10 средний размер частиц в синтезированных смесях составляет 13,76 мкм. В то же время, при применении соотношения 1:30 размер частиц уменьшается до 7,59 мкм. Установлено, что основной фазой во всех образцах является магний. Однако при соотношении 1:30 наблюдается формирование гексагональной кристаллической решетки фазы MgNi и образование фазы CeNi.

Ключевые слова: механосинтез, механическая активация, порошковая смесь, водород, магний.

EVALUATION OF THE EFFECT OF MECHANOSYNTHESIS PARAMETERS ON THE MORPHOLOGY OF A MAGNESIUM-BASED POWDER COMPOSITION

**N. M. Mukhamedova, A. Zh. Miniyazov, O. Oken*, Zh. N. Ospanova,
A. A. Sabyrtayeva, K. S. Shaikieva, T. D. Akhmedi**

Branch “Institute of Atomic Energy” RSE NNC RK, Kurchatov, Kazakhstan

** E-mail for contacts: oken@nnc.kz*

This article presents an analysis of the dependence of phase and morphological changes in the powder composition of the Mg-Ni-Ce system on the parameters of mechanical synthesis. During the mechanical synthesis process, it was found that, in addition to acceleration and duration parameters, the ratio of powder to milling balls has a significant influence on changes in the structural characteristics of the material. The results of the microscopic analysis showed that with a powder-to-ball ratio of 1:10, the average particle size in the synthesized mixtures is 13.76 μm. At the same time, when applying a ratio of 1:30, the particle size decreases to 7.59 μm. It was established that magnesium is the primary phase in all samples. However, at a ratio of 1:30, the formation of the hexagonal crystal lattice of the MgNi phase and the emergence of the CeNi phase are identified.

Keywords: mechanofusion, mechanical activation, powder mixture, hydrogen, magnesium.

<https://doi.org/10.52676/1729-7885-2025-1-72-79>

УДК 550.34

ИЗУЧЕНИЕ ГЕОЛОГО-ГЕОФИЗИЧЕСКИХ И СЕЙСМОЛОГИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ ДЛЯ ВЫБОРА МЕСТА НОВОЙ СЕЙСМИЧЕСКОЙ СТАНЦИИ ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ СЕЙСМИЧНОСТИ ЗАПАДНОГО КАЗАХСТАНА

Э. А. Исагали^{1,2*}, Г. К. Умирова¹, А. Е. Великанов²

¹ Satpayev University, Алматы, Казахстан

² Филиал «Институт геофизических исследований» РГП НЯЦ РК, Курчатов, Казахстан

* E-mail для контактов: aydarovna.98@mail.ru

Обновленная карта зонирования по сейсмогенерирующим зонам 2016 г. [1] внесла некоторые изменения в области активной сейсмичности на территории Западного Казахстана. Ранее сейсмическая опасность в основном связывалась с землетрясениями от высоко активной зоны, пересекающей Каспийское море от Копетдага на Кавказ. При этом до последнего времени район исследований считался асейсмичной зоной, здесь практически не проводилось никаких инструментальных работ по изучению сейсмичности. Однако, геодинамические события последних лет показывают, что на территории Западного Казахстана происходят довольно ощутимые землетрясения, которые некоторые исследователи относят к техногенному влиянию длительно разрабатываемых месторождений нефти и газа. Специалисты настаивают на установке сети сейсмических станций для более точного определения локации землетрясений и уменьшения погрешностей при вычислении параметров геодинамических событий.

Благодаря проведению совместных работ с Мичиганским государственным университетом (США) и Институтом геофизических исследований Национального ядерного центра Республики Казахстан (ИГИ НЯЦ РК) в юго-восточной части Мангистауской области к востоку от п-ова Мангистау была установлена Мангистауская временная сеть сейсмических станций (сеть MSUAR) с целью изучения комплекса условий для выбора места установки новой сейсмической станции в Западном Казахстане и изучения сейсмичности региона [2].

На основе сбора и анализа геолого-геофизических, сейсмологических, геоморфологических данных и результатов дешифрирования были определены критерии и факторы, которые можно будет использовать при решении широкого круга задач - от открытия новых сейсмически активных областей, исследования скоростных характеристик земных недр, изучения геодинамики районов активной добычи полезных ископаемых, в том числе углеводородов до построения новых карт зонирования территории Западного Казахстана по сейсмичности.

Ключевые слова: сейсмическая опасность, землетрясение, Западный Казахстан, сейсмические станции, геология, геофизика, сейсмология.

ВВЕДЕНИЕ

Традиционно областями, характеризующимися интенсивными геодинамическими процессами (сейсмическими событиями) в Казахстане, являются юг и юго-восток его территории. За последние 134 года на этой территории произошла череда разрушительных землетрясений, из которых можно выделить землетрясения Чиликское (1889 г.) и Кеминское (1911 г.), магнитуда которых составила более 8. Последние десятилетия также характеризуются наличием интенсивных сейсмических событий с магнитудой больше 6, в перечень которых входят Жаланаш-Тюпское (1978 г., $M = 6,8$); Зайсанское (1990 г., $M = 6,8$); Байсорунское (1990 г., $M = 6,3$). Эти факты доказывают высокую сейсмическую активность юга и юго-востока Казахстана и в настоящее время. Особую опасность вызывает близость зон, потенциально опасных с точки зрения особо разрушительных землетрясений, к промышленно развитым и густонаселенным районам юга и юго-востока РК.

В соответствии с разной степенью сейсмологической, геолого-геофизической изученности и принадлежностью к различным тектоническим зонам,

территории Казахстана выделяются Алтай-Тарбагатайский, Джунгаро-Северо-Тянь-Шаньский, Каратау-Таласский и Прикаспийский регионы. Практически на всей территории Казахстана осуществлен достаточно полный комплекс сейсмологических исследований по оценке сейсмической опасности. Наибольшей полнотой и представительностью сейсмологического материала отличается территория Джунгаро-Северо-Тянь-Шаньского региона. Поскольку территория Западного Казахстана является практически асейсмичной областью и до сегодняшнего дня характеризовалась слабыми геодинамическими событиями, то Прикаспийский регион представлен данными лишь по слабым землетрясениям. Однако, Шалкарское землетрясение 2008 г. проявилось на поверхности земли интенсивностью до 7 баллов. По мнению некоторых специалистов, это землетрясение связано с техногенным влиянием длительной разработки Карачаганакского месторождения, однако по данным сети сейсмических станций Национального ядерного центра РК (НЯЦ РК), в исследуемом районе ранее уже фиксировались два небольших землетрясения 1976-го и 1989-го годов. На современном этапе соб-

ран представительный объем сейсмического материала, что дало возможность определить механизм очага землетрясений (Михайлова Н.Н., Великанов А.Е., 2008) [3] и выказать суждение в отношении природы Шалкарского землетрясения.

Если до 2017 года сейсмически активными областями, в основном, считались юг, юго-восток и частично восток РК, то на обновленной карте общего сейсмического зонирования (2017 г.) в западной части Казахстана появились сейсмически активные зоны. При этом недостатком проведенного сейсмического зонирования является слабая инструментальная изученность, а порой и полное отсутствие инструментальных сейсмических наблюдений, реально регистрирующих землетрясения. Связано это с низкой плотностью сейсмических сетей в Западном Казахстане, отсутствием систематических сейсмических наблюдений стационарными сейсмическими станциями. Лишь Комплексная сейсмологическая экспедиция (КСЭ) Института физики Земли АН СССР эпизодически на короткий период длительностью около года выставляла сейсмические станции, укомплектованные короткопериодной аппаратурой с собственным периодом 1,5 с, 1,25 с. Все эти станции оперировали на сравнительно небольшой территории вблизи хребта Мугоджары, являющегося южным отрогом Уральских гор. На Мангышлакском полуострове, Прикаспийской впадине и других районах Западного Казахстана сейсмические наблюдения в советский период не проводились.

Если международные системы изучения сейсмичности регистрируют, в основном, интенсивные геодинамические события, сильные землетрясения, то слабые землетрясения могут быть зарегистрированы только отдельными станциями, имеющимися в этом регионе (станция Актюбинск и сейсмическая группа Акбулак сети НЯЦ РК). Но этого совершенно недостаточно для достоверной локализации, и может приводить к систематическим ошибкам в оценках местоположения гипоцентров землетрясений.

Представленные сведения являются основанием для создания новой станции или сейсмической группы в составе региональной сети НЯЦ РК и глобальной международной системы в Западном Казахстане. Учитывая, что Западный Казахстан является зоной, в которой могут происходить разрушительные землетрясения как техногенного, так и природного характера, актуальность исследований является бесспорной с точки зрения повышения точности локализации и распознавания природы регистрируемых геодинамических событий и их прогноза.

Целью представленных исследований является изучение геолого-геофизических и сейсмологических условий для выбора места установки новой сейсмической станции с целью определения сейсмичности Западного Казахстана.

Достижение цели будет выполнено за счет последовательного решения следующих задач:

1. Изучение геологических и геоморфологических особенностей строения района исследований;
2. Проявление особенностей геологического строения в геофизических полях и их учет при выборе места сейсмической станции;
3. Изучение тектонической обстановки района на основе анализа всех имеющихся геолого-геофизических материалов, цифровой модели рельефа, а также дешифрирования спутниковых снимков;
4. Анализ сеймотектонической характеристики исследуемой территории.

Объектом исследования является Мангистауская временная сеть сейсмических станций (сеть MSUAR), которая была установлена в юго-восточной части Мангистауской области в рамках выполнения совместных работ с Мичиганским государственным университетом (США) и Институтом геофизических исследований (ИГИ НЯЦ РК) с целью изучения сейсмических условий для выбора места установки новой сейсмической станции в Западном Казахстане и сейсмичности региона.

Район расположения 16 временных сейсмических станций находится в юго-западной части плато Устюрт. Северная группа станций расположена в пределах увала Карабаур, центральная группа станций – в районе увала Музбель, западная группа станций – в районе впадины Карынжарык, южная группа станций расположена южнее увала Музбель на относительно ровном месте (рисунок 1, а, б).

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В геологическом отношении район работ расположен в западной части Туранской плиты, входящей в состав молодой Центрально-Евразийской платформы. Сейсмическим зондированием установлено, что мощность земной коры на большей территории западной части Туранской плиты составляет 40–45 км [4].

Консолидированная кора состоит из верхнего – гранитного и нижнего – базальтового слоев; граничная скорость сейсмических волн на поверхности базальтового слоя составляет 6,8–7,4 км/сек, однако эта граница прослеживается хуже, чем верхняя граница консолидированной коры. Мощность гранитного слоя меньше мощности базальтового слоя.

Кристаллический фундамент довольно четко прослеживается по скоростям сейсмических волн 5,6–6,5 км/сек на глубинах 10–12 км и вопрос о его внутреннем строении и возрасте является спорным. Большинство исследователей считает, что фундамент Туранской плиты – гетерогенный и только в западной части – байкальский. Предполагается, что этот крупный массив байкальской консолидации подвергся дроблению и частичной переработке в эпохи активизации тектонических движений. На отдельных участках в раннем или среднем палеозое возникли внутренние геосинклинали – миогеосинклинали-авлакогены (Центрально-Мангышлакская, Южно-Эмбинская, Кассарминская и Туаркырская), где заложилась

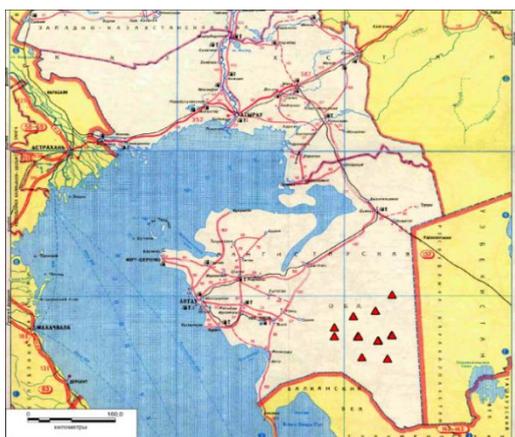
глубокие прогибы и накопились мощные толщи осадков, претерпевшие затем инверсию, складчатость и разную степень метаморфизма. Миогеосинклинали ограничены крупными разломами и представляют собой узкие (первые десятки километров) и протяженные (до сотен километров) геосинклинальные зоны.

Местоположение сейсмической группы «Мангистау» приурочено к восточной части Центрально-Мангышлакской миогеосинклинали, история которой начинается предположительно с пермского периода, а прогибание и осадконакопление продолжалось в триасе. Инверсия и складкообразование произошло в конце триаса. Пермотриасовые молассовые и карбонатные формации выходят на поверхность и слагают хребты Каратаушик, Западный и Восточный Каратау, а также горки Кунабай, Карашек и Карамая. В значительной степени пермотриасовые отложения погребены под мезокайнозойскими осадками.

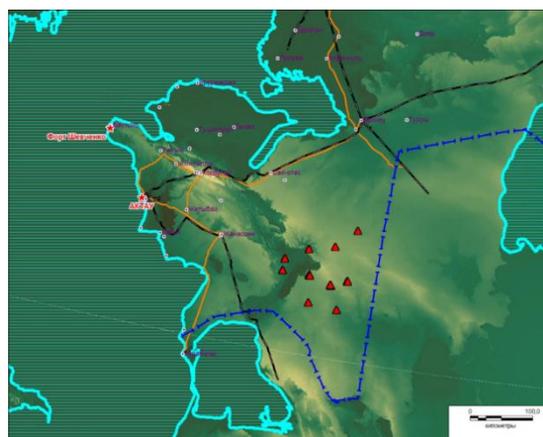
На большей части территории Западной части Туранской плиты на кристаллическом фундаменте зале-

гает комплекс пород от нижнепалеозойского до триасового возраста мощностью 3–5 км. Многие исследователи называют этот комплекс эпигеосинклинальным, а структуры этого комплекса – квазиplateформенными. Верхние горизонты этого комплекса были вскрыты рядом скважин на Северном и Южном Устье, и Южном Мангышлаке. Они представлены преимущественно красноцветными молассовыми породами пермотриаса, это – песчаники, алевролиты, реже аргиллиты.

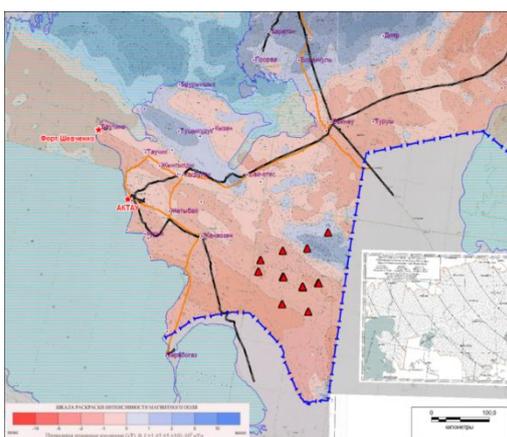
Собственно платформенный чехол начинается с рет-лейасовых отложений и включает в себя все мезозойские и кайнозойские отложения [5]. Строение платформенного чехла тесно связано с рельефом поверхности эпигеосинклинального комплекса и поверхности фундамента. Во многих случаях крупные структуры платформенного чехла наследуют структуры эпигеосинклинального комплекса и фундамента. Однако более мелкие, локальные структуры платформенного чехла являются наложенными и не находят отражения в структурах фундамента.



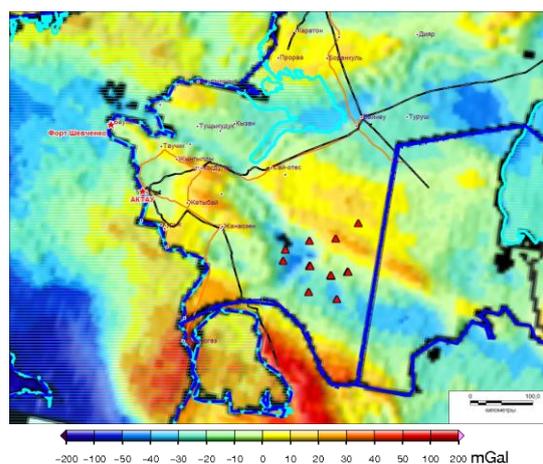
а)



б)



в)



г)

Рисунок 1. Местоположение временных сейсмических станций: на обзорной карте Мангистауской области (а); на карте цифровой модели рельефа (б); на карте аномального магнитного поля (в) и на карте аномалий силы тяжести в свободном воздухе (г)

Помимо квазиплатформенного структурного яруса на Туранской плите выделяются 4 структурных яруса: рет-лейасовый (терригенно-карбонатный (глины, алевролиты, аргиллиты, песчаники, пески, конгломераты, мергели, известняки, доломиты), среднеюрско-нижнемиоценовый (карбонатно-терригенный), среднемиоценово-нижнеплиоценовый (карбонатно-терригенный), среднеплиоценово-четвертичный (терригенно-карбонатный, существенно терригенный).

Центрально-Мангышлакская миогеосинклиналь (Мангышлакско-Центрально-Устюртская система дислокаций и Южно-Мангышлакско-Устюртская система прогибов) представляет собой систему крупных антиклинальных и синклиналильных зон. Она протягивается от берегов Каспийского моря через п-ов Тюбкараган, через весь Мангышлак, Центральный Устюрт до аллювиальной долины Аму-Дарьи. С севера она ограничена Южно-Бузачинским, на востоке – Северо-Устюртским Барсакельмесским прогибами. В эту миогеосинклиналь входят Тюбкараганская антиклинальная зона, Каратауская мегантиклиналь, Чакырганская антиклинальная зона, Беке-Башкудукская антиклинальная зона, Сегендыкский, Жазгурлинский, Ассаке-Ауданский прогибы и ряд синклиналильных и антиклинальных зон восточного Мангышлака и западной части Устюрта. Жазгурлинский прогиб занимает большую часть Южно-Мангышлакского плато и протягивается до чинков Устюрта. Его размеры 200×70 км, длина ступени 120 км, ширина 30 км. С этой ступенью связаны крупнейшие месторождения нефти. Подошва меловых отложений фиксируется на глубине около 400 м. Жазгурлинский прогиб выполнен отложениями среднемиоценово-нижнеплиоценового и среднеплиоценово-четвертичного ярусов.

Геоморфологические особенности района

Изображение цифровой модели рельефа (Рисунок 1, б), полученной по результатам высокоточной спутниковой радарной съёмки SRTM, детально отражает геоморфологию изучаемого района. Западные сейсмические станции расположены в зоне пониженных значений рельефа. Изучение этой зоны показало, что на ранних стадиях развития полуостров Мангышлак был островом. Область пониженных значений рельефа могла быть проливом, образованным по системе ослабленных тектонических зон и соединяющим Мёртвый Култук, впадину Карынжарык и залив Кара-Богаз-Гол. В настоящее время эта зона подвержена более интенсивным процессам эрозии и денудации земной поверхности, в результате которых обнажились более древние породы перми, триаса, юры, мела и палеогена.

Геофизическая характеристика

В целом геологическое строение исследуемой территории отражается в геофизических полях. Общее северо-западное простирание геологических

структур соответствует простиранию геофизических полей и аномалий. Направление линий границ значенный знакопеременного магнитного поля отражает местоположение тектонических разломов первого и второго порядков, в том числе и северо-западное направление основного Мангышлакского разлома. В северной части района расположения сейсмических станций локализуется магнитная аномалия, вытянутая в северо-западном направлении, примыкая к Мангышлакскому разлому с северо-восточной стороны (рисунок 1, в) [6]. По-видимому, здесь под мезокайнозойскими осадочными породами залегает массив базальтоидных пород кристаллического фундамента, который наиболее близко подходит к земной поверхности.

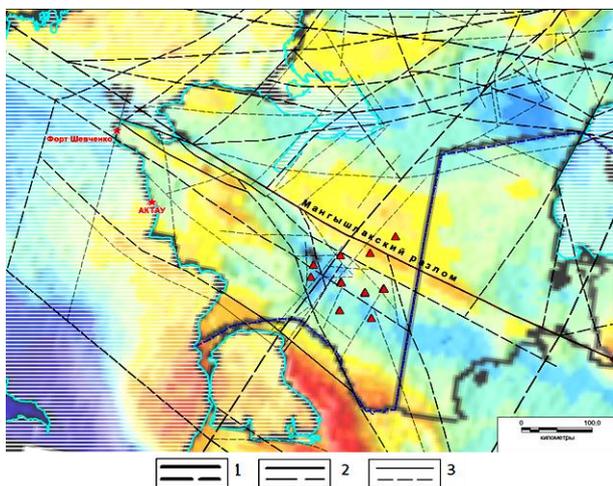
Гравитационная карта аномалий в свободном воздухе в меньшей степени отражает влияние геологических структур, так как напрямую зависит от характера рельефа местности (рисунок 1, г). В северной части местоположения сейсмических станций наблюдается вытянутая в северо-западном направлении аномалия силы тяжести, связанная, с одной стороны, с увеличением абсолютных отметок увала Карабаур, так и, возможно, с гравитационным эффектом от глубинных базальтоидных пород. В районе западных сейсмических станций наблюдается отрицательная аномалия силы тяжести, которая связывается, с влиянием горных пород с низкими плотностными характеристиками. Пространственно это аномалия приурочена к наиболее пониженным формам рельефа впадины Карынжарык. И в том, и в другом случае возможно проявление двойной природы гравитационных аномалий. С одной стороны, на измеренные значения силы тяжести оказывают влияние абсолютные отметки высоты места, с другой – избыток или недостаток масс. Отсюда следует, что горные породы, слагающие этот район, могут вызывать здесь повышенную глубинную сейсмическую нестабильность недр и возможное периодическое появление сейсмических шумов, связанных с изменяющимися лунно-солнечными приливными силами.

В результате анализа всех имеющихся материалов, включая интерпретацию геофизических полей и цифровой модели рельефа, а также дешифрирование спутниковых снимков, построена тектоническая схема района работ (рисунок 2). На схеме показаны тектонические разломы первого, второго и третьего порядков. Положение основных разломов глубинного заложения первого порядка и часть разломов второго порядка было уточнено и, в основном, совпадает со всеми разломами, выделенными ранее выполненными работами и отображёнными на тектонических картах и схемах по Прикаспийскому региону. Разломы второго и третьего порядка были откартированы по результатам современных исследований.

Таким образом, сеть сейсмических станций расположена на пересечении тектонических разломов северо-западного и северо-восточного направлений.

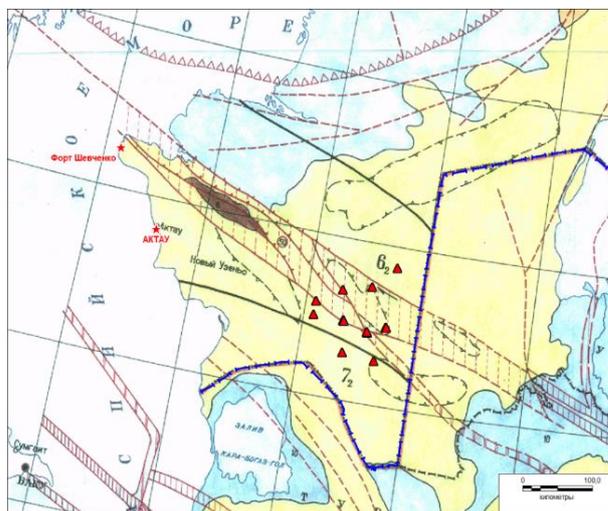
Среди них отмечаются разломы первого порядка Мангышлакский (северо-западный) и Карынжарыкский (северо-восточный), который является продолжением Мугоджарского (Предуральского) разлома на юго-запад в Туранскую плиту. Остальные разломы являются второстепенными. Отсюда отмечаем, что наиболее благоприятным местом для размещения

стационарной сейсмической станции (или группы) является, возможно, юго-восточная часть местоположения полевых станций, геологическое строение которой определяется меньшей тектонической нарушенностью, отсутствием геофизических аномалий и меньшей изрезанностью рельефа местности.

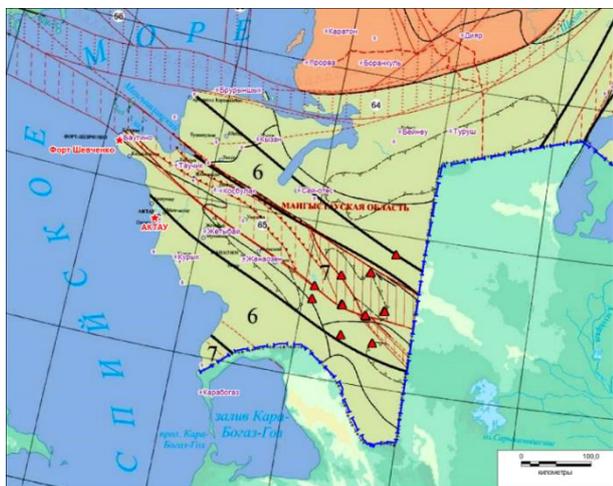


1 – разломы первого порядка в коренных породах и перекрытые рыхлыми отложениями (пунктиром); 2 – разломы второго порядка; 3 – разломы третьего порядка; в качестве подложки использована карта аномалий силы тяжести в свободном воздухе

а)



б)



в)



Рисунок 2. Схема расположения временных сейсмических станций на: тектонической схеме Мангыштауской области (а); карте общего сейсмического районирования РК 2003 года (б); карте общего сейсмического зонирования 2016 года (в)

Сейсотектоническая характеристика

Рассматривалась по картам сейсмического районирования территории Казахстана 2003 г. и 2017 г. [1]. (рисунок 2, б, в), на которых приводятся положения сейсмогенерирующих зон, максимальная магнитуда возможных землетрясений в них, а также изолинии сейсмической интенсивности в баллах по шкале MSK-64. Временные сейсмические станции приурочены к Центрально-Мангышлак-Устюртской сейсмогенерирующей зоне с максимальной магнитудой $M_{max} \leq 5$. На карте районирования 2003 года изолинии балльности и их значения для района Центрально-Мангышлак-Устюртской сейсмогенерирующей зоны построены преимущественно с учетом значительного влияния соседней Балкан-Копетдагской сейсмогенерирующей зоны, находящейся южнее за пределами исследуемой площади и имеющей высокий сейсмopotенциал ($M_{max} > 8$). Здесь сама Центрально-Мангышлак-Устюртская сейсмогенерирующая зона попадает в район сейсмической интенсивности 6 по шкале MSK-64 (рисунок 2, б).

На карте общего сейсмического зонирования 2016 года изолинии балльности и их значения построены с учётом возможного влияния самой Центрально-Мангышлак-Устюртской сейсмогенерирующей зоны, в пределах которой для неё выделена зона сейсмической интенсивности 7 по шкале MSK-64 (рисунок 2, в). Дополнительно в северной части исследуемой площади показана выделенная позже Южно-Эмбенско-Мугоджарская сейсмогенерирующая зона с $M_{max} \leq 4,5$.

Центрально-Мангышлак-Устюртская сейсмогенерирующая зона (№ 65 на карте) пространственно определяется одноимённой системой дислокаций, представляющих собой зону поднятий, проходящую в ЗСЗ направлении, отделяя Северо-Устюртскую синеклизу вместе с Южно-Бузачинским прогибом от Южно-Мангышлак-Устюртской системы прогибов Туранской плиты. Северной границей названной зоны является Центрально-Мангышлак-Устюртский глубинный разлом. Южная граница описываемой зоны проходит по Беке-Башкудукскому и Шахпахтинскому разломам, прослеженным вплоть до поверхности базальтового слоя земной коры. Характерной чертой внутренней структуры описываемой зоны является высокая степень дислоцированности платформенных отложений, включая и верхнепермско-триасовый (Каратауский) комплекс, складчатая структура которого видна в обнаженных ядрах Каратауского антиклинория. В Центрально-Мангышлак-Устюртской зоне широко развиты складчато-надвиговые структуры, охватывающие и мезозойские, и кайнозойские толщи. Прямое отражение этих структур в рельефе, а также имеющие место случаи надвигания отложений палеогена на четвертичные образования, свидетельствуют о том, что рассматриваемая тектоническая зона и сейчас находится под воздействием сил субмеридионального горизонтального сжатия. Интенсивные складчато-надвиговые дислокации платформенного чехла в данном случае представля-

ют собой проявление шовной складчатости, в результате которой образовалась линейная инверсионная раннекиммерийская зона, активная до настоящего времени. Очаги землетрясений с $M = 5,0-5,5$ приурочены и могут возникнуть в зонах разуплотнения литрального типа в нижних горизонтах сиалического комплекса коры.

Южно-Эмбенско-Мугоджарская сейсмогенерирующая зона (№ 64 на карте) выделена как предполагаемая между сближающимися на северо-восток Южно-Эмбенским и Северо-Устюртским разломами. Зона выделяется всеми исследователями как граничная между древней Русской и молодой Туранской платформами, в ее пределах происходит значительная перестройка земной коры. Рассматриваемая зона достаточно определенно трассируется геоморфологическими, геофизическими методами и космофотодешифрированием [Журавлев, 1960; Аристархова, 1971; Муратов, 1986; Тимуш, 2011].

К северу от названной зоны мощность сиалического комплекса коры сокращена до 2–5 км, тогда как мощность нижнего базитового увеличена до 25–30 км. К югу от Эмбенской зоны мощность палеозойского комплекса быстро сокращается. Наконец, по разные стороны Южно-Эмбенской зоны наблюдается различный характер структуры платформенного чехла: в Прикаспийской впадине господствуют структуры соляной тектоники, а на Северном Устюрте складки чехла приобретают черты линейности, причем их ориентировка субпараллельна зоне сочленения разновозрастных платформ. Приведенные данные позволяют рассматривать Южно-Эмбенскую зону как подвижный на новейшем этапе элемент земной коры, игравший важную роль в геологическом развитии региона в течение всего неогена. Вдоль этой зоны происходит, по-видимому, надвигание Северо-Устюртского блока на Северо-Прикаспийский, либо поддвигание последнего под край Туранской платформы. В южной части зоны отмечено три слабых землетрясения с магнитудой $M = 3-4$. Проведенный кластерный анализ комплекса параметров [Шапилов, Тимуш и др., 2010; Тимуш, 2011] привел к заключению, что максимальная магнитуда землетрясений не должна превышать $M = 4,5$ [7].

Выводы

Сбор, анализ и обобщение представительного объема априорной информации позволил выделить следующие факторы по выбору месторасположения сейсмической станции на территории Западного Казахстана:

1. Геологическое строение Центрально-Мангышлакской миогеосинклинали (Мангышлакско-Центрально-Устюртская система дислокаций и Южно-Мангышлакско-Устюртская система прогибов), к которым приурочено местоположение системы временных сейсмических станций, имеет сложное геологическое строение и представляет собой систему крупных антиклинальных и синклиналиных зон;

2. Стоит обратить внимание на местоположение западных сейсмических станций сети MSUAR в зоне

пониженных значений рельефа. В настоящее время эта зона подвержена более интенсивным процессам эрозии и денудации земной поверхности, в результате которых обнажились более древние породы перми, триаса, юры, мела и палеогена. Этот факт нужно учитывать при окончательном выборе места стационарной сейсмической группы, так как при глобальном изменении климата, связанного с общим потеплением и повышением уровня мирового океана, а также уровня Каспийского моря, ожидается возврат раннего геоморфологического строения;

3. Магнитное поле отражает местоположение тектонических разломов первого и второго порядков, в том числе и северо-западное направление основного Мангышлакского разлома;

4. Гравиметрическая карта в меньшей степени отражает расположение геологических структур, так как несёт в себе информацию о характере рельефа местности. Наблюдаемая на территории исследования двойная природа аномалий силы тяжести, предопределяет здесь повышенную сейсмическую нестабильность недр на глубине;

5. Сейсмогенерирующие зоны, к которым приурочено местоположение временных сейсмических станций, характеризуются развитием складчато-надвиговых структур отложений палеогена на четвертичные образования, что свидетельствует о том, что рассматриваемая тектоническая зона и сейчас находится под воздействием сил субмеридионального горизонтального сжатия. Очаги землетрясений с $M = 5,0-5,5$ приурочены и могут возникнуть в зонах разуплотнения литрального типа в нижних горизонтах сиалического комплекса коры;

6. Таким образом, наиболее благоприятным местом для размещения стационарной сейсмической станции (или группы) является, возможно, юго-восточная часть местоположения полевых станций, геологическое строение которой определяется меньшей тектонической нарушенностью, отсутствием геофизических аномалий и меньшей изрезанностью рельефа местности.

Введение в строй одной или нескольких сейсмических станций позволит по-новому взглянуть на сейсмичность территории Западного Казахстана, даст возможность открытия новых ранее неизвестных сейсмически активных областей, откроет новые границы для исследования скоростных характеристик земных недр, позволит изучать геодинамику районов активной добычи полезных ископаемых, в том числе углеводородов.

Данные исследования финансировались Министерством энергетики Республики Казахстан в рамках научно-технической программы BR24792713 «Развитие атомной энергетики в Республике Казахстан».

ЛИТЕРАТУРА

1. СП РК 2.03-30-2017 «Строительство в сейсмических зонах» (с изменениями и дополнениями по состоянию на 21.10.2021 г.)
2. Результаты Казахстанско-Американского полевого эксперимента 2021–2022 гг. в западном Казахстане по изучению условий сейсмической регистрации / Макки Кевин, Михайлова Н. Н., Мукамбаев А.С. // Сборник материалов XI Казахстанско-Китайского международного симпозиума «Прогноз землетрясений, оценка сейсмической опасности и сейсмического риска в Центральной Азии» 26–29 сентября 2023 года. Алматы. – С. 199–205.
3. Михайлова Н.Н., Великанов А.Е. Шалкарское землетрясение 26 апреля 2008 года // Промышленность Казахстана 12.2008–02.2009. – Вып. 6(51)–1(52). – С. 52–55.
4. Геологическое строение Казахстана / Бекжанов Г. Р., Кошкин В. Я., Никитченко И. И. и др. / Алматы: Академия минеральных ресурсов РК. – 2000. – 396 с.
5. Геология СССР. Т. 21. Западный Казахстан. М.: Недра, 1970.
6. Аномальное магнитное поле Казахстана. – Научное издание Комитета геологии и охраны недр Министерства энергетики и минеральных ресурсов РК / Главный редактор Б.С. Ужкенов, ответственный исполнитель О.В. Игнатюк. Кокшетау 2004.
7. Тимуш, А.В. и др. Сейсмогенерирующие зоны Казахстана / А.В. Тимуш [и др.] – Алматы: ТОО «Хай Технолоджи», 2012. – 80 с.

REFERENCES

1. SP RK 2.03-30-2017 «Stroitel'stvo v seysmicheskikh zonakh» (s izmeneniyami i dopolnениyami po sostoyaniyu na 21.10.2021 g.)
2. Rezul'taty Kazakhstansko-Amerikanskogo polevogo eksperimenta 2021–2022 gg. v zapadnom Kazakhstane po izucheniyu usloviy seysmicheskoy registratsii / Makki Kevin, Mikhaylova N. N., Mukambaev A.S. // Sbornik materialov XI Kazakhstansko-Kitayskogo mezhdunarodnogo simpoziuma «Prognoz zemletryaseniy, otsenka seysmicheskoy opasnosti i seysmicheskogo riska v Tsentral'noy Azii» 26–29 sentyabrya 2023 goda. Almaty. – P. 199–205.
3. Mikhaylova N.N., Velikanov A.E. Shalkarskoe zemletryasenie 26 aprelya 2008 goda // Promyshlennost' Kazakhstana 12.2008–02.2009. – Issue. 6(51)–1(52). – P. 52–55.
4. Geologicheskoe stroenie Kazakhstana / Bekzhanov G. R., Koshkin V. Ya., Nikitchenko I. I. i dr. / Almaty: Akademiya mineral'nykh resursov RK. – 2000. – 396 p.
5. Geologiya SSSR. Vol. 21. Zapadnyy Kazakhstan. Moscow: Nedra, 1970.
6. Anomal'noe magnitnoe pole Kazakhstana. – Nauchnoe izdanie Komiteta geologii i okhrany neдр Ministerstva energetiki i mineral'nykh resursov RK / Glavnnyy redaktor B.S. Uzhkenov, otvetstvennyy ispolnitel' O.V. Ignatyuk. Kokshetau 2004.
7. Timush, A.V. i dr. Seysmogeneriruyushchie zony Kazakhstana / A.V. Timush [i dr.] – Almaty: TOO «Khay Tekhnolodzhi», 2012. – 80 p.

**БАТЫС ҚАЗАҚСТАННЫҢ СЕЙСМИКАЛЫҒЫН ЗЕРТТЕУ ҮШІН ЖАҢА СЕЙСМИКАЛЫҚ
СТАНЦИЯНЫҢ ОРНЫН ТАҢДАУҒА АРНАЛҒАН ГЕОЛОГИЯЛЫҚ, ГЕОФИЗИКАЛЫҚ
ЖӘНЕ СЕЙСМОЛОГИЯЛЫҚ ЗЕРТТЕУЛЕР**

Ә. А. Исағали^{1,2*}, Г. К. Умирова¹, А. Е. Великанов²

¹ *Satpayev University, Алматы, Қазақстан*

² *ҚР ҰЯО РМК «Геофизикалық зерттеулер институты» филиалы, Курчатова, Қазақстан*

* *Байланыс үшін E-mail: aydarovna.98@mail.ru*

2016 жылғы сейсмикалық зоналау картасында [1] Батыс Қазақстандағы белсенді сейсмикалық аймақтарда бірқатар өзгерістер енгізілді. Бұрын сейсмикалық қауіп негізінен Каспий теңізі арқылы Копетдагтан Кавказға өтетін жоғары белсенді аймақтың жер сілкіністерімен байланысты болатын. Алайда, соңғы уақытқа дейін зерттеу аймағы асейсмикалық аймақ болып саналып, мұнда сейсмикалық зерттеулер жүргізілмеген. Дегенмен, соңғы жылдардағы геодинамикалық оқиғалар Батыс Қазақстанда айтарлықтай жер сілкіністері болып жатқанын көрсетеді, оларды кейбір зерттеушілер мұнай мен газ кен орындарының техногендік әсерімен байланыстырады. Сарапшылар жер сілкіністерінің орындарын нақты анықтау және геодинамикалық оқиғалардың параметрлерін есептеу кезінде қателіктерді азайту үшін сейсмикалық станциялар желісін орнату қажеттігін айтуда.

Мичиган мемлекеттік университеті (АҚШ) және Қазақстан Республикасының Ұлттық ядролық орталығы Геофизикалық зерттеулер институтымен (ГЗИ ҰЯО ҚР) бірлескен жұмыстардың нәтижесінде Маңғыстау облысының оңтүстік-шығыс бөлігінде, Маңғыстау түбегінің шығысында, Батыс Қазақстанда жаңа сейсмикалық станция орнату үшін жағдайларды зерттеу және аймақтың сейсмикалық белсенділігін зерттеу мақсатында Маңғыстаулық уақытша сейсмикалық станциялар желісі (MSUAR желісі) орнатылды.

Геологиялық-геофизикалық, сейсмологиялық, геоморфологиялық деректерді жинау және талдау негізінде жаңа сейсмикалық белсенді аймақтарды ашудан, жер қыртысының жылдамдық сипаттамаларын зерттеуден, пайдалы қазбаларды, оның ішінде көмірсутектерді белсенді өндіру аймақтарының геодинамикасын зерттеуден бастап, Батыс Қазақстанның сейсмикалық белсенділігі бойынша жаңа карталарды құруға дейінгі кең ауқымды міндеттерді шешу үшін қолдануға болатын критерийлер мен факторлар анықталды.

***Түйін сөздер:** сейсмикалық қауіптілік, жер сілкінісі, Батыс Қазақстан, сейсмикалық станциялар, геология, геофизика, сейсмология.*

**STUDY OF GEOLOGICAL, GEOPHYSICAL, AND SEISMOLOGICAL CONDITIONS FOR SELECTING
A SITE FOR A NEW SEISMIC STATION TO STUDY THE SEISMICITY OF WESTERN KAZAKHSTAN**

A. A. Issagali^{1,2*}, G. K. Umirova¹, A. Ye. Velikanov²

¹ *Satpayev University, Almaty, Kazakhstan*

² *Branch "Institute of Geophysical Research" RSE NNC RK, Kurchatov, Kazakhstan*

* *E-mail for contacts: aydarovna.98@mail.ru*

The present article provides review of seismic certainty and knowledge of Kazakhstan territory. The certain changes have been introduced to the picture of active seismicity of Western Kazakhstan once updated map for seismogenic zones was issued in Year 2016. Previously, seismic hazards had been mainly associated with potential earthquakes from a highly active zone crossing the Caspian Sea from the Kopet Dag to the Caucasus. Moreover, up to date mentioned area had been considered as an aseismic zone with no practical efforts to investigate seismic activity. However, recent geodynamic events demonstrated quite noticeable record of the earthquakes in Western Kazakhstan attributed by some researchers to technogenic impact from extensive production development of petroleum and gas deposits. The experts insist on arrangement of seismic arrays' grid to ensure more accurate verification of earthquakes and mitigate errors in geodynamic events parameters estimation.

The joint effort of Michigan State University (USA) and Institute for Geophysical Researches of the National Nuclear Center of the Republic of Kazakhstan undertaken in the south-eastern part of Mangistau Province, east of the Mangistau Peninsula, resulted with deployment of Mangystau array (MSUAR) – Mangistau Temporary Network of Seismic Arrays aimed to run feasibility study to substantiate location of a new seismic array in Western Kazakhstan and further investigate seismicity of the region.

The numerous criteria and factors had been identified based on the findings of collection and analysis of geological-geophysical, seismological, geomorphological data including interpretation results and mentioned criteria and factors shall be further used to address wide range of challenges.

***Keywords:** seismic hazard, earthquake, Western Kazakhstan, seismic arrays, geology, geophysics, seismology.*

<https://doi.org/10.52676/1729-7885-2025-1-80-89>
УДК 621.039.5

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЕВРОПЕЙСКОГО РЕАКТОРА ПОД ДАВЛЕНИЕМ (EPR) С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ КОДА MCNP

У. А. Жумадилова*, И. В. Прозорова, А. К. Мухамедиев, А. А. Прозоров,
Ю. А. Попов, Б. С. Медетбеков, Р. Р. Сабитова, С. Н. Светачев

Филиал «Институт атомной энергии» РГП НЯЦ РК, Курчатов, Казахстан

* E-mail для контактов: zhumadilova@nnc.kz

Моделирование ядерных реакторов является одним из важных этапов обеспечения безопасности и оптимизации их характеристик.

Данная работа посвящена оценке характеристик активной зоны реактора EPR при его различных режимах работы с целью рассмотрения данного типа реактора как возможного кандидата для строительства АЭС в Казахстане. Исследования заключались в разработке расчетной модели реактора EPR и проверке релевантности полученных расчетных данных. Исследования проведены с использованием метода Монте-Карло, реализованного в программе MCNP и позволяющего детально анализировать нейтронно-физические процессы, происходящие в активной зоне реактора. В статье представлены описание реактора EPR, методика проведения исследований, компьютерная модель, результаты моделирования и сравнение расчетных данных с литературными.

Ключевые слова: европейский реактор под давлением, EPR, MCNP, расчетная модель, нейтронно-физические характеристики, активная зона.

ВВЕДЕНИЕ

Проект строительства атомной электростанции (АЭС) в Казахстане находится на важном этапе выбора подходящего технико-коммерческого предложения. В процессе активного изучения предложений от ведущих мировых производителей атомных технологий из 13 представленных проектов были выбраны четыре наиболее подходящих: из Франции, Китая, России и Южной Кореи.

В данной статье предложена расчетная MCNP модель реактора EPR для анализа безопасности и надежности реактора с целью рассмотрения его как кандидата реактора для строительства АЭС в Казахстане.

Актуальность исследования связана с нейтронно-физическим анализом Европейского реактора под давлением (EPR) с использованием N-частиц Монте-Карло (MCNP5). Основная цель исследования заключалась в разработке входной модели, из которой возможно получить плотности потоков нейтронов и распределения энерговыделения реактора по всей АЗ. Проведено сравнение результатов с данными отчета по анализу безопасности EPR. Выполнена оценка соответствия основных эксплуатационных параметров активной зоны, включая значение эффективного коэффициента размножения, осевые и радиальные профили энерговыделения и ценности системы регулирующих стержней, на основании чего подтверждена согласованность модели и результатов.

Научная новизна разработки модели реактора заключается в нескольких аспектах, во-первых, нейтронно-физическая модель является основой для анализа и прогнозирования работы ядерного реактора. Во-вторых, возможность прогнозирования аварийных ситуаций, оценку устойчивости системы к внеш-

ним воздействиям. В-третьих, модель может учитывать изменения в работе реактора, например, из-за изменения температуры, состава топлива, нейтронных поглотителей или воздействия внешних факторов (например, изменений в мощности реактора).

Европейский реактор под давлением (EPR) – это один из наиболее безопасных и современных реакторов третьего поколения, он был разработан компанией Framatome ANP Inc. с совместным дочерним предприятием AREVA и Siemens. EPR представляет собой усовершенствованную версию реактора типа PWR (Pressurized Water Reactor) на тепловых нейтронах с более высоким КПД и усовершенствованными системами безопасности. Мощность EPR зависит от конкретной модели, однако стандартные параметры для типичного реактора EPR следующие:

- электрическая мощность: 1,6–1,7 ГВт;
- тепловая мощность: 4,5 ГВт.

Концепция и разработка реактора EPR ведется с конца 90-х годов XX-го столетия. В статье [1] авторами описывается, что разработка EPR учитывает опыт эксплуатации более чем 100 атомных электростанций, спроектированных и построенных Siemens и Framatome. В статье излагаются достоинства этого реактора: повышенная безопасность при конкурентоспособной стоимости и стандартизация конструкции, которая позволяет осуществлять строительство в мировом масштабе. Авторами другой статьи [2] проведены сравнение и оценка существующих и новых технологий и концепций, включая вид теплоносителя и нейтронные спектры. Результаты указывают на высокий потенциал реактора EPR по сравнению с большинством действующих реакторов типа LWR (Light Water Reactor) и PWR. В статье [3] описаны различные стратегии управления топливной кампанией ре-

актора EPR с циклами 12, 18 и 24 месяца. Экономический анализ выполнен для иллюстрации низкого потребления урана и высокой производительности топливного цикла по сравнению с большинством современных традиционных реакторов PWR. В статье [4] авторами сделан анализ экологических и экономических последствий эксплуатации реакторов типа EPR для различных стратегий топливного цикла. Проведен анализ всех этапов его существования – от строительства и эксплуатации до вывода из эксплуатации и утилизации отходов. Королевство Саудовская Аравия рассматривает возможность развертывания гражданской ядерной программы с реакторами EPR, мощность которых прогнозируется на уровне 18 ГВт к 2032-2040 годам. Моделирование этого реактора, включая все этапы жизненного цикла и равновесный топливный цикл, было выполнено авторами статьи [5] с использованием кода MCNP6.

Цель исследований состояла в проверке адекватности разработанной расчетной модели реактора EPR и релевантности полученных расчетных данных. В статье представлены описание реактора, методика проведения исследований, компьютерная модель, результаты моделирования и сравнение расчетных данных с литературными. Компьютерная модель реактора EPR может быть использована для определения характеристик активной зоны (АЗ) реактора EPR при различных режимах работы реактора.

Программный код MCNP (Monte Carlo N-Particle) широко используется для моделирования переноса частиц, таких как нейтроны и фотоны, что делает его одним из ведущих инструментов для расчета нейтронно-физических характеристик ядерных реакторов. Применение MCNP для моделирования реакторов типа EPR дает возможность детально анализировать процессы, происходящие в АЗ, учитывать влияние конструктивных элементов на потоки частиц и оценивать радиационную обстановку реактора [6, 7].

В данной статье представлено моделирование реактора EPR с помощью программы MCNP6. Данная работа основана на доступной информации компании Framatome ANP Inc. [8–11].

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Описание АЗ EPR

Реактор EPR представляет собой четырехконтурную станцию с тепловой мощностью 4590 МВт. Такая высокая тепловая мощность в сочетании с эффективным использованием топлива позволяет достигать электрической мощности примерно 1650 МВт, что делает его одним из самых мощных энергетических реакторов.

АЗ реактора EPR включает 241 топливную сборку (ТВС) семи типов. Каждая ТВС представляет собой решетку 17×17 и состоит из 265 тепловыделяющих

элементов (ТВЭлов) и 24 направляющих трубок для стержней управления, соединенных в квадратную конструкцию. Топливные стержни ТВЭлов состоят из диоксида урана с обогащением до 3,25 % масс. по U-235 и могут содержать оксид гадолиния (Gd₂O₃) с концентрацией от 2 до 8 % масс. для улучшения поглощения нейтронов. Оболочка ТВЭлов и направляющие трубки для стержней управления выполнены из сплава M5™, обладающего высокой коррозионной стойкостью и низким уровнем разбухания. Основная конфигурация АЗ на начальном этапе эксплуатации реактора приведена на рисунке 1.

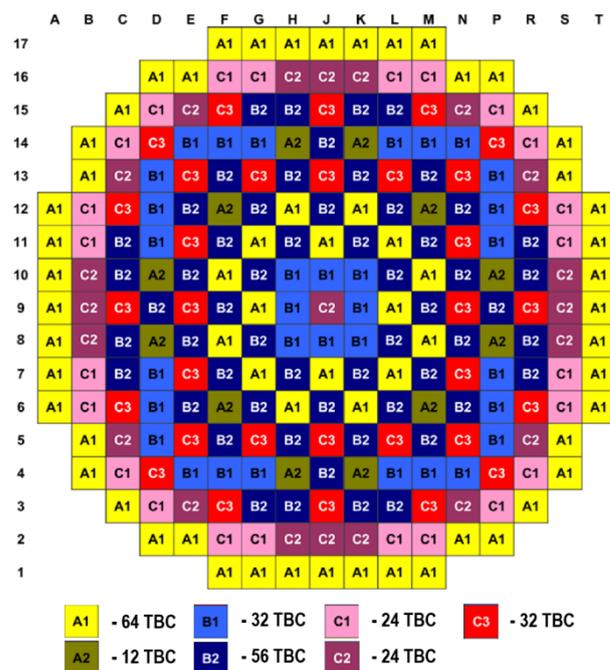


Рисунок 1. Основная конфигурация АЗ на начальном этапе эксплуатации реактора

Конструктивные особенности каждого типа ТВС реактора EPR приведены на рисунках 2 и 3.

Во всех типах ТВС имеются три зоны, распределенные по высоте АЗ: бланкетная, сокращенная и центральная. Бланкетные зоны, расположенные сверху и снизу ТВС, содержат мало делящегося материала и служат для уменьшения утечки нейтронов. Сокращенная зона, между бланкетной и центральной, содержит топливо с наибольшим обогащением и обеспечивает равномерное энерговыделение в АЗ. Центральная зона, где сосредоточена основная масса делящихся изотопов, отвечает за основное энерговыделение. Такое разделение помогает оптимизировать нейтронный баланс и выгорание топлива.

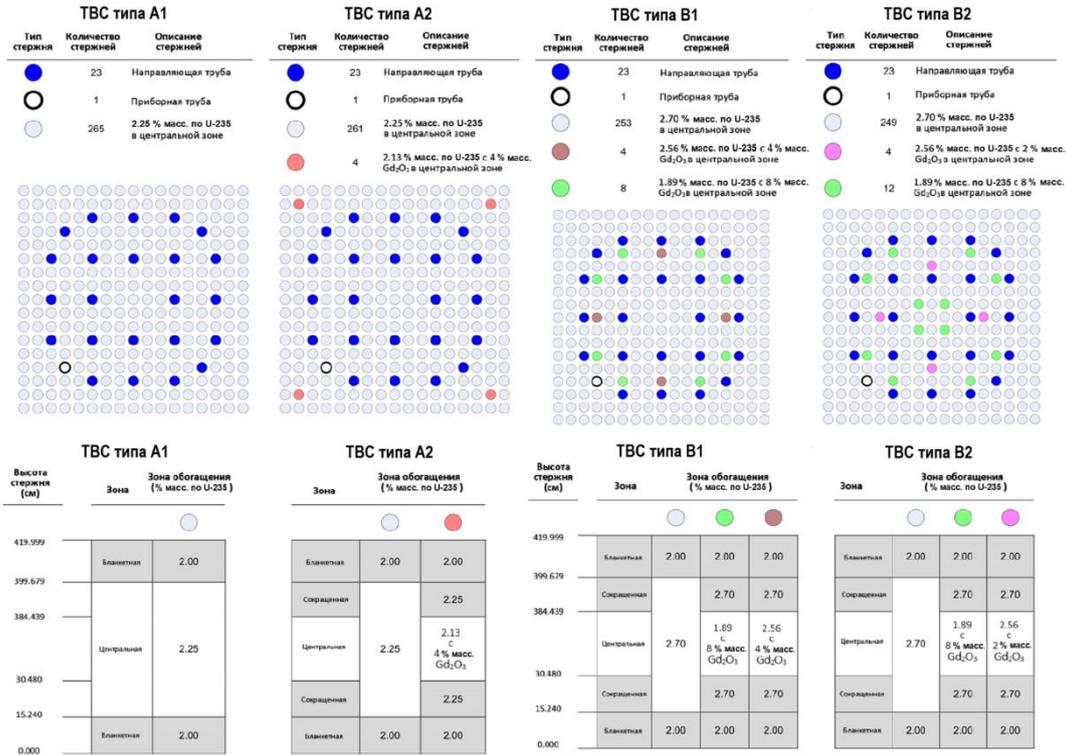


Рисунок 2. Конструктивные особенности TBC (A1, A2, B1 и B2)

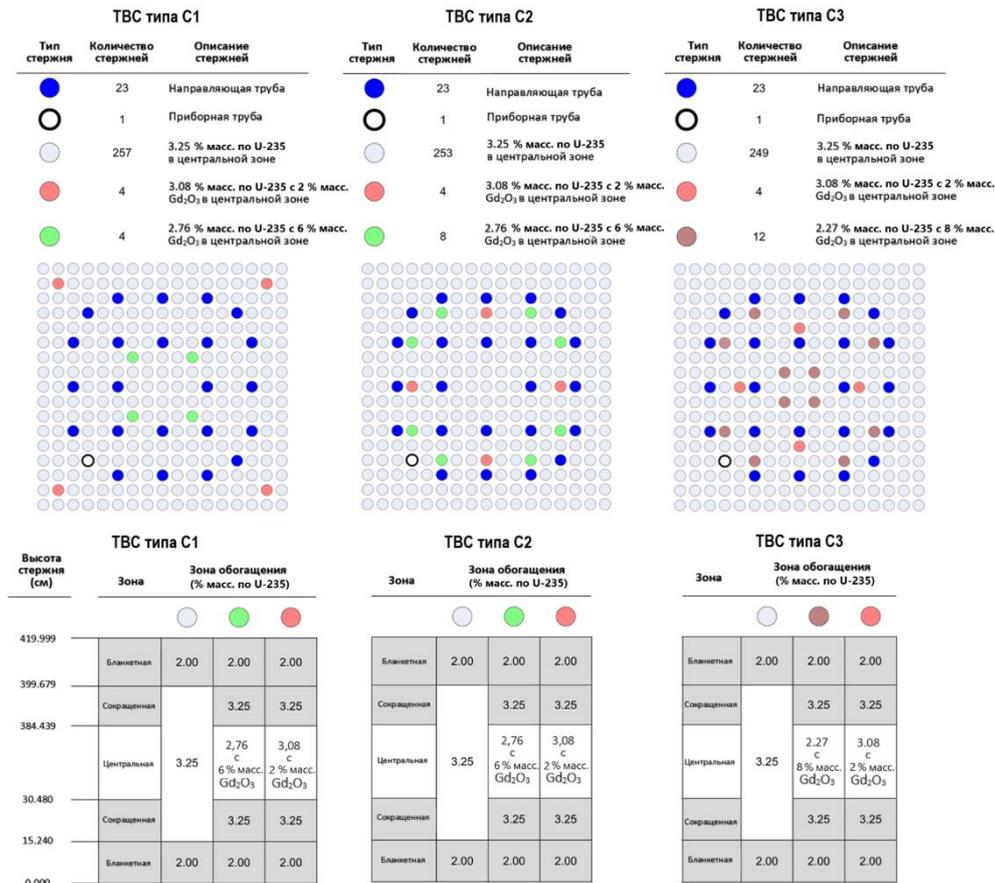


Рисунок 3. Конструктивные особенности TBC (C1, C2 и C3)

В реакторе EPR направляющие трубки и стержни КУС (кластер управляющих стержней), состоящие из 89 пучков управляющих стержней, обеспечивают управление цепной реакцией и безопасность. Направляющие трубки, расположенные в ТВС, служат каналами для перемещения стержней КУС. КУС состоит из 24 отдельных стержней, прикрепленных к узлу крестовины. Каждый из отдельных стержней КУС представляет собой поглотитель, содержащий серебро (Ag, 80 % масс.), индий (In, 15 % масс.) и кадмий (Cd, 5 % масс.), размещенный в оболочке из нержавеющей стали. Перемещение стержней КУС в АЗ реактора играет ключевую роль в системе управления ядерным реактором. Эта система позволяет эффективно регулировать мощность реактора, контролируя уровень его реакции. В случае возникновения аварийной ситуации или необходимости быстрой остановки реактора, стержни КУС могут быть полностью введены в АЗ, что моментально снижает интенсивность цепной реакции. Таким образом, система КУС обеспечивает не только стабильную и безопасную работу реактора, но и оперативное его выключение в случае необходимости, гарантируя высокую степень безопасности и управляемости процесса.

Разработка модели EPR

В ходе исследований разработана детализированная геометрическая модель и заданы составы материалов, соответствующие реальной конструкции реактора. При разработке модели были приняты следующие положения:

- стационарный режим;
- отсутствие обратной связи по температуре;
- отсутствие выгорания/используется свежее топливо;
- начало жизненного цикла;
- отсутствие отравления реактора ксеноном.

Для моделирования в программе MCNP6 использовалась версия 6.2 (EXE-ONLY) с библиотекой данных ENDF/B-VII.1 [12-13]. Эта версия содержит обновленные сечения для многих изотопов и охватыва-

ет широкий диапазон температур и энергий. Моделирование было выполнено в несколько этапов.

Этап 1: Моделирование геометрии

При создании модели реактора EPR (рисунок 4) были смоделированы следующие основные элементы:

- корпус реактора и корпус АЗ;
- АЗ: все 7 типов ТВС смоделированы как решетка 17×17 и установлены в соответствии со схемой на рисунке 1. Общее количество ТВС – 241. Одна ТВС состоит из 265 топливных стержней и 24 направляющих труб, предназначенных для введения стержней управления;
- тяжелый отражатель: смоделирован как однородная смесь воды и нержавеющей стали;
- замедлитель: вода;
- стержни системы управления и защиты КУС;
- теплоноситель: вода с бором, циркулирующая между ТВЭлами.

На рисунке 5 представлена модель ТВС типа С2 в продольном и поперечном разрезах. Остальные типы ТВС смоделированы в аналогичном образе, но различным составом топлива.

Этап 2: Состав материалов

На втором этапе были определены составы топливных и конструктивных материалов для моделирования реактора EPR, представленные в таблице 1 [8, 14–17].

Этап 3: Основная расчетная модель EPR

Третий этап включал в себя выбор варианта расчетной модели для дальнейшего исследования основных нейтронно-физических характеристик. Основным критерий выбора – реактор должен находиться в состоянии критики.

Результаты расчетов на критичность для различных состояний АЗ реактора и концентраций бора в теплоносителе приведены в таблице 2. В качестве сравнения и проверки результатов расчета использован отчет по анализу безопасности (ОАБ) EPR [8].

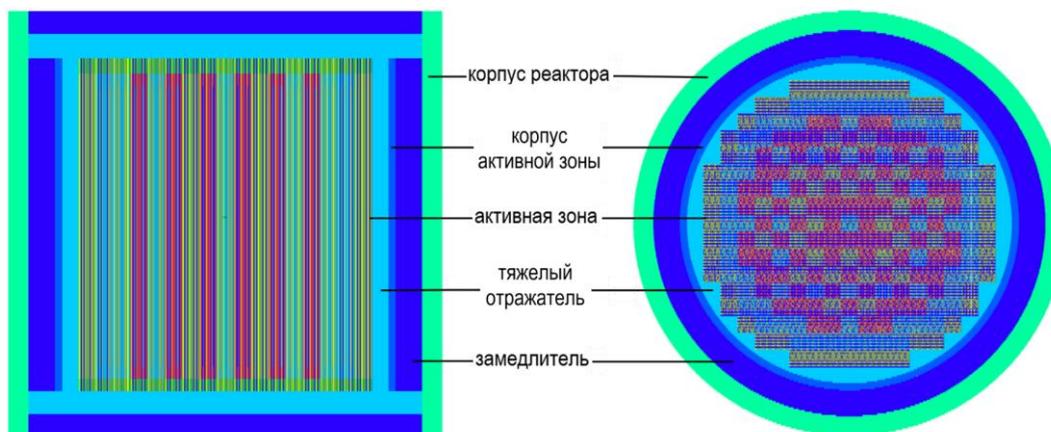


Рисунок 4. Графическое представление расчетной модели реактора EPR

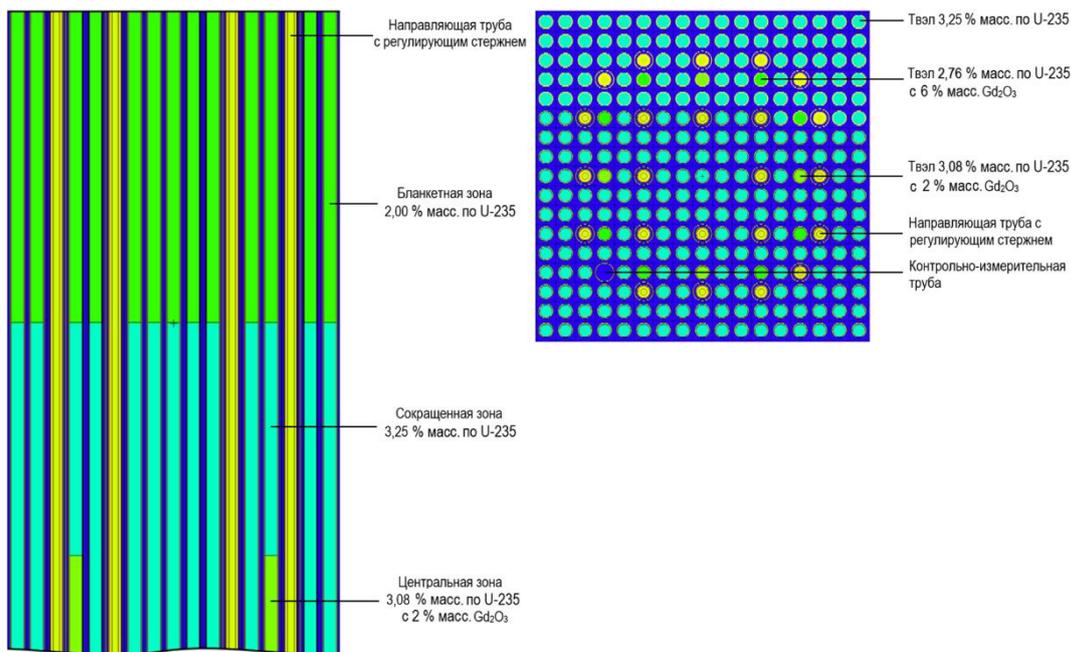


Рисунок 5. Модель ТВС типа C2, вид сбоку и сверху

Таблица 1. Составы материалов EPR

Элемент реактора	Состав	Плотность, г/см ³	Примечание
Таблетки	UO ₂	9,15	обогащение составляет от 1,89 до 3,25 % по U-235
	UO ₂ и Gd ₂ O ₃	9,15	концентрация оксида гадолиния в топливе от 2 до 8 %
Оболочка твэла	M5™	6,506	циркониевый сплав (Zircaloy)
Теплоноситель и замедлитель	H ₂ O и В	–	плотность меняется в зависимости от температуры теплоносителя и концентрации природного бора
Газ	He	1,7846 · 10 ⁻⁴	в зазоре твэлов инертный газ гелий
Поглотитель	Ag-In-Cd	10,17	поглотитель нейтронов управляющих стержней КУС (80-Ag15-In 5-Cd)
Корпус реактора	16MND5 и NiCrFe	7,2	смоделирован как однородный цилиндр, изготовленный из низколегированной стали, внутренняя поверхность которого плакирована сплавом NiCrFe
Корпус АЗ реактора	304L (18Cr-8Ni)	7,93	низкоуглеродистая хромистая нержавеющая сталь
Тяжелый отражатель	304L (18Cr-8Ni) и H ₂ O	5,5	смоделирован как гомогенная смесь воды и нержавеющей стали с 95 % нержавеющей стали и 5 % воды

Таблица 2. Результаты сравнительного анализа

№	Мощность	Состояние	Стержни КУС	Концентрация бора в теплоносителе, ppm	Kэфф		R, %
					ОАБ EPR	MCNP6	
1	нулевая	холодное ¹	извлечены	1593	0,99	0,96322±0,00006	2,71
2	нулевая	горячее ²	извлечены	1600	0,99	0,96137±0,00006	2,89
3	нулевая	холодное ¹	вставлены	1215	0,95	0,94483±0,00006	0,54
4	нулевая	горячее ²	извлечены	1485	1,00	0,97144±0,00006	2,86
5	полная	горячее ²	извлечены	1383	1,00	0,98080±0,00006	1,92
6	полная	горячее ²	извлечены	1200	–	0,99813±0,00006	–

Примечания:

- Холодное состояние реактора для теплоносителя составляет 38°F (276,48 K), но для расчета MCNP6, из-за отсутствия в базе данных температурных значений, задана 293,6 K.
- Горячий реактор по [8] имеет температуру теплоносителя 578°F (576,48 K) для нулевой мощности и 563.42°F (568,48 K) для полной мощности. В расчетных моделях температура теплоносителя задана как 600 K, а температура топлива – 1200 K.

Для сравнения значений $k_{эфф}$ в критическом состоянии определено относительное отклонение по формуле:

$$R = |x_1 - x_2|/x_1 \times 100\%,$$

где R – отклонение; x_1 – значение из ОАБ EPR [8], x_2 – расчетное значение.

Полная мощность означает работу реактора на максимальной электрической мощности, предусмотренной проектом. Нулевая мощность (минимально контролируемый уровень) соответствует работе реактора, при которой процессы теплообразования и выработки электроэнергии минимальны или отсутствуют, однако реактор все равно может находиться в контролируемом состоянии.

В результате сравнения данных из литературных источников с полученными расчетными значениями $k_{эфф}$ отклонение составляет от 0,5% до 3%, что является вполне допустимым для данного вида моделирования с учетом различия используемых температурных библиотек.

Варьируя концентрации природного бора в теплоносителе от 100 до 2400 ppm, соответствующей горячему реактору на полной мощности, получена основная расчетная модель с $k_{эфф} = 0,99813 \pm 0,00006$, которая использована для дальнейших исследований основных нейтронно-физических параметров реактора EPR, в таблице это соответствует варианту № 6. Концентрация бора в теплоносителе для этого варианта составила 1200 ppm.

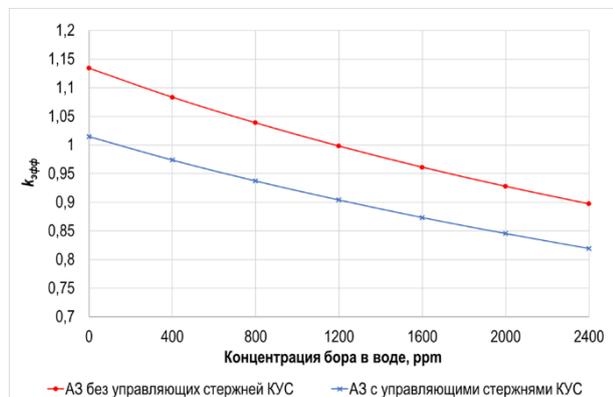


Рисунок 6. Влияние концентрации бора на эффективный коэффициент размножения

Результаты влияния концентрации бора на $k_{эфф}$ при полностью введенных в АЗ и извлеченных из АЗ стержнях управления КУС в расчетной модели представлены на рисунке 6. При полностью введенных в АЗ стержнях управления реактор должен быть полностью подкритичным ($k_{эфф} < 1$), но при этом в теплоносителе концентрация бора не должна опускаться ниже 100 ppm, так как дальнейшее уменьшение концентрации бора приведет к повышению критичности реактора ($k_{эфф} \geq 1$).

По результатам, приведенным на графике, видно, что повышение концентрации бора в обоих случаях (с стержнями в АЗ и без) приводит к уменьшению $k_{эфф}$ за счет большего поглощения тепловых нейтронов. Изменение концентрации бора во время эксплуатации реактора позволяет контролировать мощность реактора и предотвращать нежелательное увеличение реактивности.

Для дальнейших нейтронно-физических исследований модели EPR были приняты следующие положения:

- горячий реактор;
- температура топлива 1200 К;
- плотность топлива 9,15 г/см³;
- концентрация бора в теплоносителе 1200 ppm;
- температура теплоносителя 600 К;
- плотность теплоносителя 0,66 г/см³;
- стержни управления КУС отсутствуют.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЯ

В результате проведенных исследований получены высотное распределение нейтронного потока, распределение энерговыделения по высоте и радиусу АЗ реактора EPR, а также выполнены расчеты веса стержней КУС.

Распределение плотности потока нейтронов в АЗ

Высотное распределение плотности потока нейтронов рассмотрено для трёх диапазонов энергий: теплового (от 0 до 0,414 эВ), промежуточного (от 0,414 эВ до 0,1 МэВ) и быстрого (от 0,1 до 1 МэВ).

Полученное расчетное распределение для мощности реактора 4590 МВт представлено на рисунке 7. Численные значения плотности потока нейтронов по АЗ приведены в таблице 3.

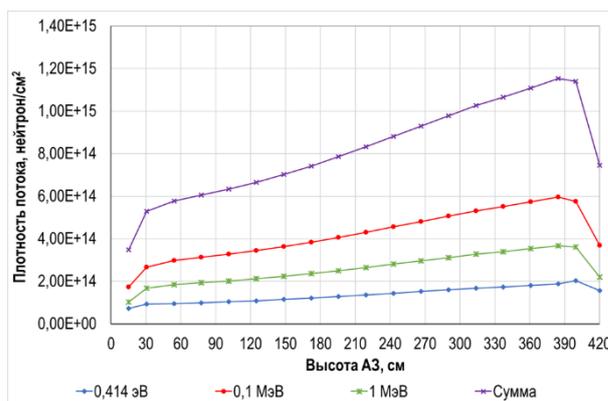


Рисунок 7. Распределение плотности потока нейтронов по высоте АЗ на мощности 4590 МВт

Из графика на рисунке 7 можно заметить, что плотность потока нейтронов в тепловой группе ($E \leq 0,414$ эВ) существенно ниже, чем в двух других группах с более высокими энергиями. Это, вероятно, связано с тем, что сечение поглощения для диапазона тепловых энергий значительно выше, чем для других более высоких энергий.

Таблица 3. Значения плотности потока нейтронов в АЗ реактора

Местоположение	Значения плотности потока нейтронов, н/см ²							
	сумма		E ≥ 1,0 MeV		0,1 MeV ≤ E < 1,0 MeV		E ≤ 0,414 eV	
	MCNP6	ОАБ EPR	MCNP6	ОАБ EPR	MCNP6	ОАБ EPR	MCNP6	ОАБ EPR
Центральная зона	8,42E+14	4,43E+14	2,68E+14	1,11E+14	4,34E+14	2,34E+14	1,40E+14	3,84E+14
Нижняя бланкетная зона	3,09E+14	3,33E+13	9,06E+13	6,10E+12	1,55E+14	1,32E+13	6,36E+13	6,88E+12
Верхняя бланкетная зона	6,00E+14	8,91E+13	1,76E+14	1,85E+13	3,00E+14	3,86E+13	1,24E+14	1,76E+13

Приведенные значения в ОАБ EPR основаны на усредненных по времени параметрах АЗ реактора равновесного топливного цикла и распределениях мощности и подходят для долгосрочных прогнозов. Долгосрочные прогнозы включают прогнозирование поведения реактора в течение длительных периодов времени с учетом распределения нейтронного потока, мощностных эффектов и изменений, зависящих от времени. В случае расчетов MCNP6 приведены средние значения плотности потока нейтронов на начало цикла эксплуатации.

Распределение энерговыделения по высоте и радиусу АЗ

Были проведены расчеты по определению энерговыделения в ТВС для конфигурации АЗ без управляющих стержней. Значения относительного энерговыделения ТВС по радиусу АЗ представлены на рисунке 8, при этом среднее значение энерговыделения по АЗ принято равным 1,00.

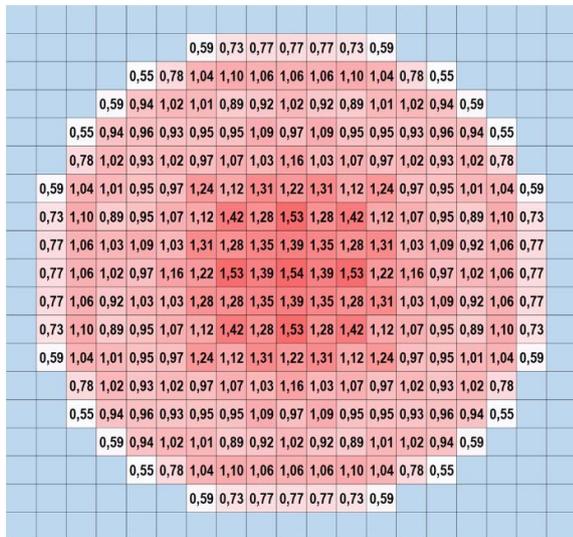


Рисунок 8. Распределение энерговыделения по радиусу АЗ

Из рисунка 8 видно, что максимальное значение имеет центральная ТВС типа С2, а минимальные – ТВС типа А1, которые расположены на периферии АЗ. Коэффициент неравномерности по радиусу АЗ равен 1,54.

На рисунке 9 показано распределение энерговыделения ТВС по высоте АЗ, где приведено значения для ТВС типа С2 с максимальным энерговыделением, для ТВС типа А1 с минимальным энерговыделением и среднее значение по всем 241 ТВС.

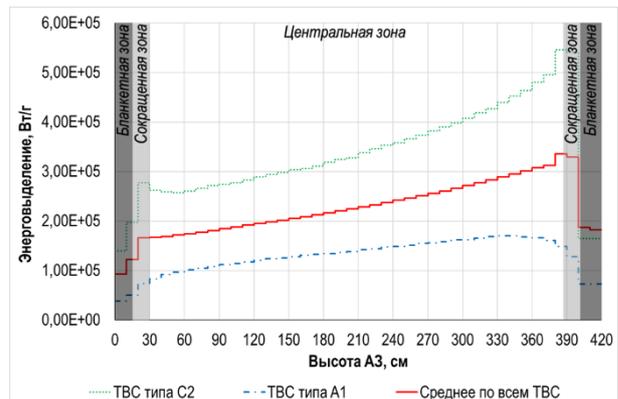


Рисунок 9. Распределение энерговыделения по высоте АЗ

На графике рисунка 9 видно, что распределение энерговыделения по высоте АЗ следует той же тенденции, что и распределение плотности потока нейтронов на рисунке 7. Энерговыделение растет снизу в вверх в центральной зоне ТВС, а в бланкетных зонах энерговыделение минимальное, по краям распределений можно отметить пики. Пики связаны с тем, что в сокращенных зонах ТВС обогащение твэлов самое высокое и отсутствуют поглощающие элементы. Для ТВС типа А1, характеризующихся минимальным количеством делящегося материала в топливе и отсутствием сокращенных зон, кривая распределения более гладкая.

На рисунке 10 представлено распределение среднего энерговыделения в твэлах наиболее энергонапряженной ТВС типа С2. Черными квадратами выделены направляющие трубки. Максимальное значение энерговыделение находится в центральной области, а минимальные значения наблюдаются в твэлах, где в составе топлива имеется оксид гадолиния. Коэффициент неравномерности по радиусу ТВС типа С2 равен 1,09.

Далее было определено энерговыделение по высоте АЗ для каждого твэла ТВС типа С2. На рисунке 11 приведены распределения энерговыделения по высоте твэла для вариантов с максимальным, минимальным и средним энерговыделением по всем 265 твэлам.

По графику из рисунка 11 видно, что во всех твэлах ТВС типа С2 распределение энерговыделения повышается снизу вверх. Минимальные значения энерговыделения в бланкетных зонах. Пики энерговыделения приходятся на сокращенные зоны, в которых топливо имеет максимальное обогащение.

1,05	1,04	1,04	1,04	1,04	1,04	1,04	1,04	1,04	1,04	1,04	1,04	1,04	1,04	1,04	1,04	1,05
1,04	1,04	1,03	1,04	1,03	1,05	1,03	1,03	1,04	1,03	1,03	1,05	1,03	1,04	1,03	1,04	1,04
1,04	1,03	1,04	1,06	1,03	1,01	1,01	1,01	1,01	1,01	1,03	1,06	1,04	1,03	1,04	1,04	1,04
1,04	1,04	1,06	0,99	0,40	0,95	0,96	0,51	0,96	0,95	0,40	0,99	1,06	1,04	1,04	1,04	1,04
1,04	1,03	1,03	0,99	0,98	0,96	0,99	1,00	1,00	1,00	0,99	0,96	0,98	0,99	1,03	1,03	1,04
1,04	1,05	0,40	0,96	1,05	1,06	1,06	1,09	1,06	1,06	1,05	0,99	0,95	1,01	1,03	1,04	1,04
1,04	1,03	1,01	0,95	0,99	1,05	1,06	1,06	1,09	1,06	1,06	1,05	0,99	0,95	1,01	1,03	1,04
1,04	1,03	1,01	0,96	1,00	1,06	1,06	1,04	1,05	1,04	1,06	1,06	1,00	0,96	1,01	1,03	1,04
1,04	1,04	0,51	1,00	1,09	1,05	1,05	1,05	1,09	1,09	1,00	0,51	1,04	1,04	1,04	1,04	1,04
1,04	1,03	1,01	0,96	1,00	1,06	1,06	1,04	1,05	1,04	1,06	1,06	1,00	0,96	1,01	1,03	1,04
1,04	1,03	1,01	0,95	0,99	1,05	1,06	1,06	1,09	1,06	1,06	1,05	0,99	0,95	1,01	1,03	1,04
1,04	1,05	0,40	0,96	1,05	1,06	1,06	1,06	1,05	1,05	0,96	0,40	1,05	1,04	1,04	1,04	1,04
1,04	1,03	1,03	0,99	0,98	0,96	0,99	1,00	1,00	1,00	0,99	0,96	0,98	0,99	1,03	1,03	1,04
1,04	1,04	1,06	0,99	0,40	0,95	0,96	0,51	0,96	0,95	0,40	0,99	1,06	1,04	1,04	1,04	1,04
1,04	1,03	1,04	1,06	1,03	1,01	1,01	1,01	1,01	1,01	1,03	1,06	1,04	1,03	1,04	1,04	1,04
1,04	1,04	1,03	1,04	1,03	1,05	1,03	1,03	1,04	1,03	1,03	1,05	1,03	1,04	1,03	1,04	1,04
1,05	1,04	1,04	1,04	1,04	1,04	1,04	1,04	1,04	1,04	1,04	1,04	1,04	1,04	1,04	1,04	1,05

Рисунок 10. Распределение энерговыделения ТВС типа C2

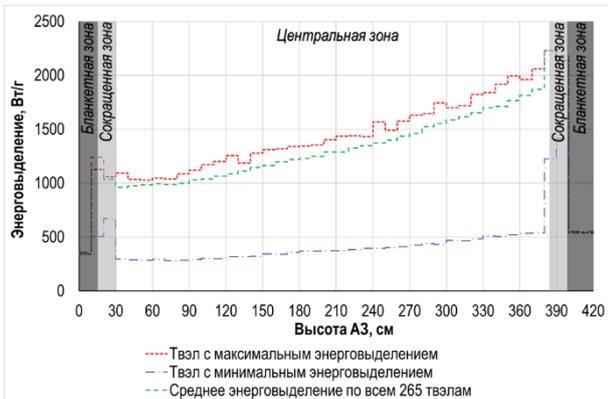


Рисунок 11. Распределение энерговыделения по высоте ТВС типа C2

В ТВС типа C2 расположены 12 ТВЭЛов с добавкой оксида гадолиния, который является поглотителем нейтронов и уменьшает теплопроводность топлива, в таких ТВЭЛах значение энерговыделения будет наименьшим. На графике представлено распределение в одном из таких ТВЭЛов.

Оценка веса регулирующих стержней КУС

Изменение положения регулирующих стержней КУС в АЗ реактора оказывает значительное влияние на его реактивность и, следовательно, на мощность, температурный режим и другие параметры работы реактора. Оценка такого влияния является важной частью анализа безопасности и управления эксплуатацией реактора.

Оценка веса стержней $\Delta\rho$ вычисляется из двух значений $k_{эфф}$ в точках состояния по формуле:

$$\Delta\rho = (k_2 - k_1) / (k_2 \times k_1) \quad [8].$$

Результаты оценки веса стержней КУС в рсм ($1 \text{ рсм} = 10^{-5}$), полученные с помощью программы MCNP6, представлены на рисунке 12.

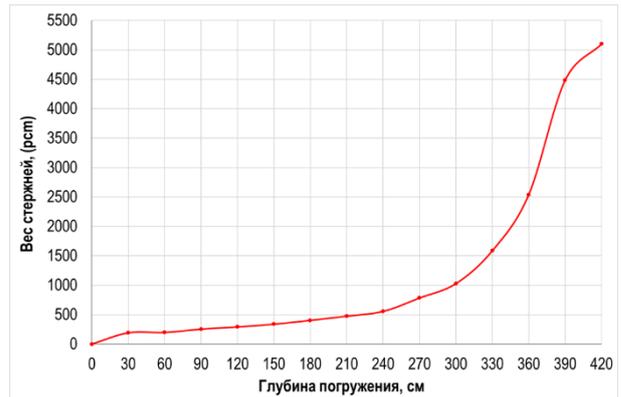


Рисунок 12. Оценка веса стержней управления реактора EPR

Начало графика (0) рисунка 12 соответствует отсутствию стержней КУС в АЗ, далее приведено пошаговое введение стержней КУС до полного погружения. По кривой, приведенной на графике рисунка 12 видно, что ценность веса стержней повышается по мере введения стержней блока управления. При полном погружении стержней КУС эффективность стержней составляет 5099 рсм.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для рассмотрения в качестве возможного кандидата реактора для АЭС в Казахстане была проведена оценка основных нейтронно-физических характеристик реактора EPR. Оценка проводилась с помощью программы MCNP6 и разработанной детализированной модели реактора. Разработанная модель продемонстрировала высокую точность при моделировании критического состояния и выполнении нейтронно-физических расчетов, включая распределение нейтронного потока, энерговыделения по высоте и радиусу реактора, а также оценку эффективности регулирующих стержней. Сравнительный анализ расчетных значений эффективного коэффициента размножения с литературными данными показал, что отклонение результатов моделирования составляет от 0,5 до 3%. Для энергетического распределения плотности нейтронного потока имеются расхождения с литературными данными. В случае расчетов MCNP6 приведены плотности потока нейтронов на начало цикла эксплуатации, в то время как в литературе значения основаны на усредненных по времени параметрах АЗ реактора.

Работа выполнена при финансовой поддержке Комитета науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан (Проект программно-целевого финансирования BR21882185 «Исследования в поддержку создания и безопасного функционирования атомной электростанции в Республике Казахстан»).

ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES

1. Fischer, U., Leverenz, R. European pressurized water reactor – designed for the new millennium // Nuclear Engineering and Design. – 2000. – Т. 39. – P. 217–221.
2. Leverenz, R., Gerhard, L., Göbel, A. The European Pressurized Water Reactor: A Safe and Competitive Solution for Future Energy Needs // Proceedings of the International Conference Nuclear Energy for New Europe, Portoroz, 6-9 September 2004. – 2004. – P. 903.
3. Zheng, S., Meini, R., Stephens, J. EPR™: A Reactor to Support Economical Fuel Cycles // Proceedings of the 18th International Conference on Nuclear Engineering. – Xi'an, China: ASME, 2010. – P. 107–112. <https://doi.org/10.1115/ICONE18-29439>
4. Simons, A., Bauer, C. Life cycle assessment of the European pressurized reactor and the influence of different fuel cycle strategies // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power and Energy. – 2012. – Vol. 226, No. 3. – P. 427–444. <https://doi.org/10.1177/0957650912440549>
5. Toward Transparency and Broader Safeguards Conclusion: A Closer Look at the Proposed Saudi's Civilian Nuclear Power Program // Journal of Scientific & Engineering Research. – 2016. – Vol. 7, No. 12.
6. Los Alamos National Laboratory (LANL). MCNP6 User's Manual: Report number: LA-CP-14-00745, Rev. 0. – Los Alamos National Laboratory, 2014.
7. Brown, B. F. Fundamentals of Monte Carlo particle transport: LA-UR-05-4983. – Los Alamos: Los Alamos National Laboratory, 2005.
8. AREVA. US EPR Final Safety Analysis Report. – Washington D.C: AREVA, 2012.
9. AREVA. US EPR Brochure. – Paris-La Defense Cedex, France: Framatome ANP, 2012.
10. AREVA. EPR Brochure. – Paris-La Defense Cedex, France: Tour AREVA, 2005.
11. AREVA. EPR Design Description. – Lynchburg: Framatome ANP, 2005.
12. Chadwick, M. B. et al. ENDF/B-VII.1 Nuclear Data for Science and Technology: Cross Sections, Covariances, Fission Product Yields and Decay Data // Nuclear Data Sheets. – 2011. – Vol. 112, No. 12. – P. 2887–2996. <https://doi.org/10.1016/j.nds.2011.11.002>
13. Parsons, D. K., Conlin, J. L. Release of Continuous Representation for S(α, β) ACE Data. – 2012.
14. Hon, R. P. Development of methods and tools for on-the-fly response function generation for criticality calculations: Dissertation. – Georgia Institute of Technology, 2016.
15. Montwedi, O. E. Neutronic simulation of a European Pressurised Reactor: Dissertation. – North-West University, 2014.
16. Boettcher, A., Marcinkowska, Z. Influence of accident tolerant fuel cladding material on the European pressurised reactor core neutronic characteristics // Annals of Nuclear Energy. – 2018. – Vol. 119. – P. 203–213.
17. Lago, D., Rahnema, F. Benchmark description of a stylized three-dimensional European Pressurized Reactor (EPR) problem // Progress in Nuclear Energy. – 2016. – Vol. 93. – P. 18–46.

ЕУРОПАЛЫҚ ҚЫСЫМДЫ РЕАКТОРЫН (EPR) MCNP КОДЫН ҚОЛДАНУ АРҚЫЛЫ МОДЕЛЬДЕУ

У. А. Жұмадилова*, И. В. Прозорова, А.К. Мухамедиев, А. А. Прозоров,
Ю. А. Попов, Б. С. Медетбеков, Р. Р. Сабитова, С. Н. Светачев

ҚР ҰЯО РМК «Атом энергиясы институты» филиалы, Курчатов, Қазақстан

* Байланыс үшін E-mail: zhumadilova@nnc.kz

Ядролық реакторларды модельдеу қауіпсіздікті қамтамасыз ету және олардың сипаттамаларын оңтайландырудың маңызды кезеңдерінің бірі болып табылады.

Бұл жұмыс реактордың осы түрін Қазақстанда атом электр стансасын салуға ықтимал үміткер ретінде қарастыру мақсатында оның әртүрлі жұмыс режимдеріндегі EPR реакторының активті аймағының сипаттамаларын бағалауға арналған. Зерттеу EPR реакторының есептеу моделін жасаудан және алынған есептеу деректерінің сәйкестігін тексеруден тұрды. Зерттеулер MCNP бағдарламасында жүзеге асырылған және реактордың активті аймағында болып жатқан нейтронды-физикалық процестерді егжей-тегжейлі талдауға мүмкіндік беретін Монте-Карло әдісін қолдану арқылы жүргізілді. Мақалада EPR реакторының сипаттамасы, зерттеу әдістемесі, компьютерлік модель, модельдеу нәтижелері және есептелген деректерді әдебиет деректерімен салыстыру берілген.

Түйін сөздер: еуропалық қысымды реактор, EPR, MCNP, есептеу моделі, нейтронды-физикалық сипаттамалар, активті аумақ.

SIMULATION OF A EUROPEAN PRESSURIZED REACTOR (EPR) USING THE MCNP CODE

**U. A. Zhumadilova^{*}, I. V. Prozorova, A. K. Muhamediev, A. A. Prozorov,
Yu. A. Popov, B. S. Medetbekov, R. R. Sabitova, S. N. Svetachev**

Branch "Institute of Atomic Energy" RSE NNC RK, Kurchatov. Kazakhstan

** E-mail for contacts: zhumadilova@nnc.kz*

Modeling of nuclear reactors is one of the important steps in ensuring safety and optimizing their characteristics. This work is devoted to assessing the characteristics of the core of the EPR reactor under its various operating modes in order to consider this type of reactor as a possible candidate for the construction of a nuclear power plant in Kazakhstan. The research culminated in the development of a computational model of the EPR reactor and the introduction of analytical methods to obtain additional data. The research was carried out using the Monte Carlo method developed in the MCNP program and designed to analyze in detail the neutron-physical processes occurring in the reactor's core. The article presents a description of the EPR reactor, a research methodology, a computer model, simulation results and a comparison of calculated data with literature data.

Keywords: *European pressurized reactor, EPR, MCNP, calculation model, neutron-physical characteristics, active zone.*

<https://doi.org/10.52676/1729-7885-2025-1-90-95>

УДК 538.9, 539.1, 539.2

CrNiZ (Z=Sb, Sn) ЖАРТЫЛАЙ ГЕЙСЛЕР ҚОРЫТПАЛАРЫНЫҢ ҚҰРЫЛЫМДЫҚ ЖӘНЕ ЭЛЕКТРОНДЫҚ ҚАСИЕТТЕРІН АВ ІНІТІО ЕСЕПТЕУЛЕРІ НЕГІЗІНДЕ ЗЕРТТЕУ

**Н. С. Солтанбек¹, Н. А. Мерәлі^{1*}, А. У. Абуова¹, Ф. У. Абуова¹, Ж. Е. Зәкиева²,
Ө. К. Әбдірашев¹, А. Б. Базарбек¹, Г. Д. Кабдрахимова¹, Т. М. Инербасев¹**

¹⁾ *Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Астана, Қазақстан*

²⁾ *Астана Халықаралық университеті, Астана, Қазақстан*

* Байланыс үшін E-mail: nurreis.93@mail.ru

Бұл мақалада CrNiZ (Z = Sb, Sn) жартылай Гейслер қорытпаларының электрондық және магниттік қасиеттері тығыздық функционалы теориясы (DFT) негізінде кванттық-химиялық әдіспен зерттелді. Есептеулерде жалпыланған градиентті жуықтау (GGA) және мета-GGA (SCAN) алмасу-корреляциялық функционалдары қолданылды. Алынған нәтижелерге сәйкес, CrNiSb қорытпасы жартылай металдық қасиетті көрсетсе, CrNiSn қорытпасы толық металдық сипатқа ие екені анықталды. Мета-GGA (SCAN) функционалы CrNiZ қорытпаларының электрондық құрылымын дәлірек сипаттайтын әдіс ретінде таңдалды. Сонымен қатар, CrNiSb қорытпасының магниттік моменті 3 μB -ке тең болып, Слейтер-Полинг ережесіне сәйкес келетіндігі анықталды.

Түйін сөздер: тығыздық функционалы теориясы, жартылай металл, Гейслер қорытпалары, электрондық қасиеттер, күйлер тығыздығы, электрондық локализация функциясы.

КІРІСПЕ

Гейслер және жартылай Гейслер қорытпалары – ерекше магниттік, топологиялық және электрондық қасиеттерге ие үштік интерметалдық материалдардың жоғары реттелген класы. Бұл қорытпалар жалпы кристалдық құрылымға ие болып, периодтық жүйенің көптеген элементтерін қамтитын 1000-нан астам әртүрлі комбинацияларды құрайды[1–8] (1-сурет). Әртүрлі зерттеу әдістері арқылы олардың қасиеттері жан-жақты зерттеліп келеді. Кубтық құрылымы бар Гейслер қорытпалары микроэлектроника мен спинтроника салаларында қолдану потенциалына байланысты ерекше назарға ие [9–14]. Кейбір Гейслер қорытпалары жоғары құрылымдық тұрақтылық пен 100% спиндік поляризацияны көрсетіп, олардың спинтроникада қолданылуына айтарлықтай мүмкіндік береді[15–19]. Яғни, өткізгіш электрондардың тек бір спин бағытында қозғалуы мүмкін. Мұндай қасиет оларды спиндік сүзгілер немесе спиндік инжекция үшін керемет материал жасайды. Бұл спинтрондық құрылғыларда ақпаратты спин арқылы сақтау мен беру тиімділігін арттырады[20].

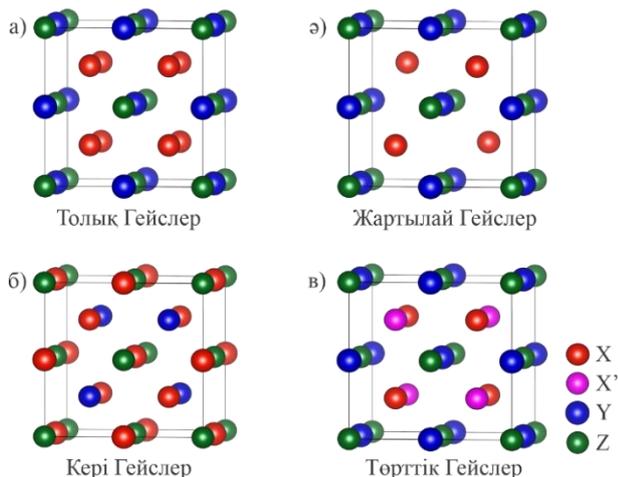
Гейслер қорытпаларының құрылымы, көбінесе, кристалдық тордағы атомдардың орналасуы арқылы реттеледі, бұл олардың қасиеттерін икемді етуге мүмкіндік береді. Құрылымдық өзгерістер жасау арқылы Гейслер қорытпаларының қасиеттерін өзгертіп, оларды нақты спинтрондық міндеттерге бейімдеуге болады.

Жартылай металдық Гейслер қорытпаларын жасау және зерттеу бүгінгі күндегі маңызды ғылыми міндеттердің бірі болып табылады. Ең жиі зерттелетін түрлерінің бірі – X_2YZ типіндегі қорытпалар, мұнда X жоғары валентті ауыспалы металл, Y төмен валентті ауыспалы металл, ал Z sp элементін құрайды. Негізінен, Гейслер қорытпаларының төрт түрі бар. Толық Гейслер қорытпалары L_21 құрылымында, кері Гейслер қорытпалары XA құрылымдарында кристалданады. Екінші кластағы Гейслер қорытпалары XYZ формуласына сәйкес келеді және $C1b$ құрылымында кристалданады. Мұндай қорытпалар жартылай Гейслер қорытпалары деп аталады, Жартылай Гейслер қорытпаларының құрылымы XYZ түрінде болады, мұнда X және Y – ауыспалы металдар, ал Z – негізгі топтың элементі. Бұл қорытпалар симметриясы төмен кубтық құрылымда кристалданады, оның кеністіктік тобы – $F43m$ (216). Мұндай құрылым ZnS тетраэдрлік құрылымына негізделген, онда октаэдрлік тордың кейбір бөліктері толтырылып, жаңа құрылым жасалады (2-сурет). Вайкофф позициялары 4A (0, 0, 0), 4B (1/2, 1/2, 1/2) және 4C (1/4, 1/4, 1/4) нүктелеріне сәйкес келеді[21–28]. Жартылай Гейслер қорытпаларының жартылай металдық қасиеттері олардың спинтроникада маңызды материал болуына мүмкіндік береді. Олардың қолданылу салаларына тоқталсақ, Қатты диск жетектері (HDD) және Спинді поляризацияланған тасымалдау негізіндегі транзисторлар. [29–30].

X_2YZ - Гейслер қоспалары

H																	He
2,20																	
Li	Be											B	C	N	O	F	Ne
0,98	1,57											2,04	2,55	3,04	3,44	3,98	
Na	Mg											Al	Si	P	S	Cl	Ar
0,93	1,31											1,61	1,90	2,19	2,58	3,16	
K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr
0,82	1,00	1,36	1,34	1,63	1,66	1,55	1,83	1,88	1,91	1,90	1,65	1,81	2,01	2,18	2,55	2,96	3,00
Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe
0,82	0,95	1,22	1,33	1,60	2,16	1,90	2,20	2,28	2,20	1,93	1,69	1,78	1,96	2,05	2,10	2,66	2,60
Cs	Ba	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn	
0,79	0,89	1,30	1,50	1,70	1,90	2,20	2,20	2,20	2,40	1,90	1,80	1,80	1,90	2,00	2,20		
Fr	Ra																
0,70	0,90																
		La	Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	
		1,10	1,12	1,15	1,14	1,13	1,17	1,20	1,20	1,10	1,22	1,23	1,24	1,25	1,10	1,27	
		As	Th	Pa	U	Np	Pu	Am	Cm	Bk	Cf	Es	Fm	Md	No	Lr	
		1,10	1,30	1,50	1,70	1,30	1,28	1,13	1,28	1,30	1,30	1,30	1,30	1,30	1,30	1,30	

Сурет 1. Химиялық элементтердің периодтық жүйесі



Сурет 2. Гейслер қорытпаларының негізгі түрлері

Жартылай Гейслер қорытпаларына деген қызығушылық алғашқы теориялық есептеулерде NiMnSb қорытпасының жартылай металдық қасиеттері анықталғаннан кейін қайта өршіді. Бұл табысты нәтижелер кейінгі зерттеулерге түрткі болып, Гейслер қорытпаларын спинтроника саласында қолдану мүмкіндіктерін тереңірек зерттеудің негізін қалады.

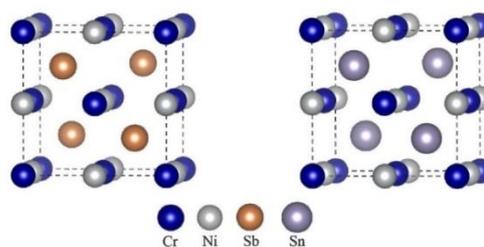
ЗЕРТТЕУ ӘДІСТЕМЕСІ

CrNiZ (Z = Sb, Sn) типіндегі Гейслер қорытпаларының электрондық және магниттік қасиеттері тығыздық функционалы теориясы (DFT) шеңберінде Vienna ab initio модельдеу пакеті (VASP) [17–20] көмегімен есептелді. Псевдопотенциалдар үшін корреляциялық алмасу функционалы ретінде Пердью-Берк-Эрнзерхоф (PBE) жалпыланған градиентті жуықтау (GGA) және meta-GGA (SCAN) әдістерімен есептеулер жүргізілді [20]. Есептеулер кезінде шекті энергия 500 эВ-қа тең, ал *k*-нүктелер торы Монкхорст-Пак әдісі бойынша 6×6×6 өлшемде таңдалды. Есептеулердің дәлдігі толық энергиялар арасындағы айырмашылық 10⁻⁷ эВ/атом шегінде болатындай етіп орнатылды. Псевдопотенциалдарда келесі электрондық конфигурациялар пайдаланылды: Cr (3d⁵4s¹), Ni (3d⁸4s²), Sb (4d¹⁰5p³), және Sn (4d¹⁰5p²).

НӘТИЖЕЛЕР

1. ҚҰРЫЛЫМДЫҚ ҚАСИЕТТЕРІ

CrNiZ (Z = Sb, Sn) жартылай Гейслер қорытпалары XYZ формуласымен анықталған C_{1b} құрылымында кристалданады және F43m кеңістіктік тобына жатады (№216). Бұл құрылымда XYZ атомдары белгілі бір Вайкофф позицияларын алады: 4a (0, 0, 0), 4b (0,5, 0,5, 0,5) және 4c (0,25, 0,25, 0,25). 3-суретте осы қорытпалардың кристалдық құрылымының визуалды көрінісі көрсетілген. Көптеген зерттеулерде X, Y және Z атомдары үшін Вайкофф позицияларының орналасуын жиі өзгеріп отырады. Біздің жағдайда Cr атомдары X позициясында, Ni атомдары Y позициясында және Sb, Sn атомдары Z позицияларында орналасқан.



Сурет 3. CrNiZ (Z=Sb, Sn) жартылай Гейслер қорытпаларының кристалдық құрылымы

Жартылай Гейслер қорытпаларындағы X, Y, және Z атомдарының координациялық ортасы олардың симметриясына және орналасуына байланысты өзгеше. Z атомдары диагональ бойындағы белгілі нүктелерде орналасқан. Z атомы (Sb немесе Sn) 4X (Cr) атомымен қоршалған. Бұл атомдардың саны аз, өйткені Z атомдары құрылымның белгілі бір бағытталған симметриясын сақтай отырып орналасқан. Y атомдары құрылымда диагональ бойынша симметриялы орналасқан. Y (Ni) атомы 4X (Cr) атомымен және 4Z (Sb немесе Sn) атомдарымен қоршалған. X атомдары құрылымның тор түйіндерінде орналасқан. X (Cr) атомы 4Y (Ni) атомымен және 4Z (Sb немесе Sn) атомымен қоршалған, бұл химиялық байланыстың беріктігін және құрылымның тұрақтылығын қамтамасыз етеді [21–25]. Төменде берілген 1 кестеде зерттелген қорытпалардың GGA және meta-GGA SCAN жуықтауларымен есептелген энергия мәндері мен тор параметрлері көрсетілген [26].

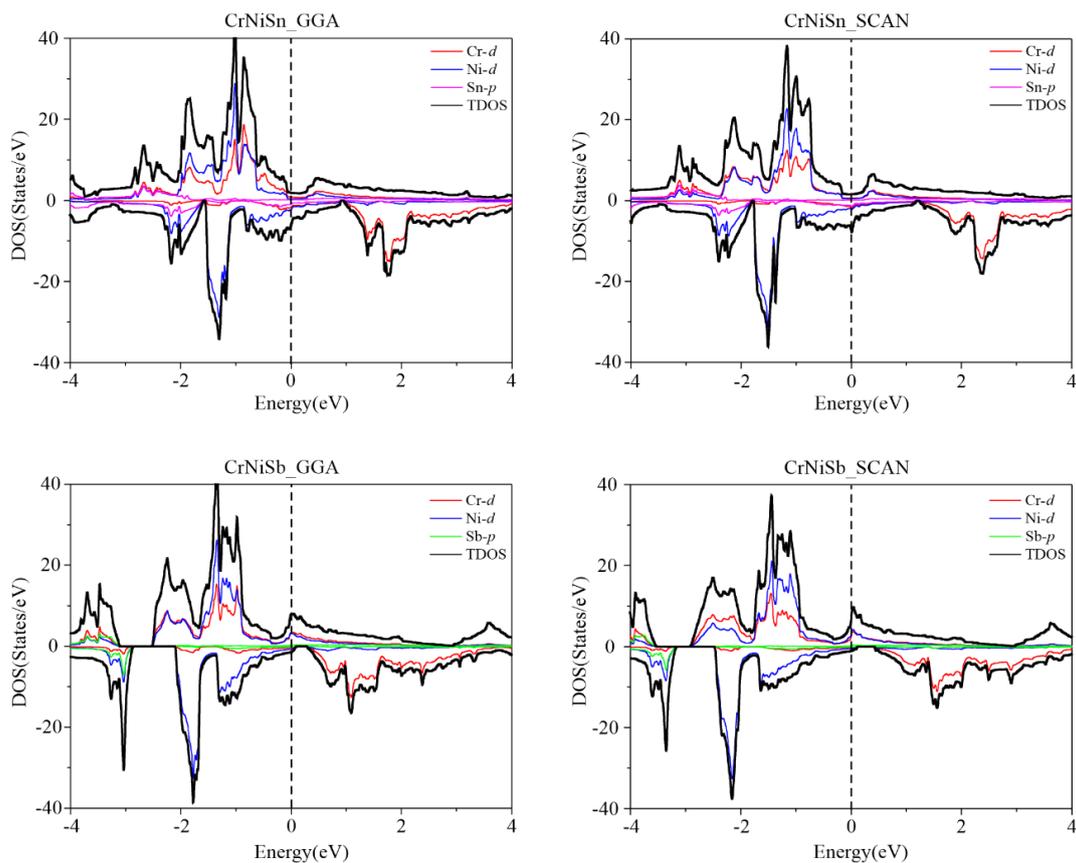
1 кесте. CrNiZ (Z=Sb, Sn) жартылай Гейслер қорытпаларының тор параметрлері мен энергия мәндері

Қорытпа	Құрылым	Функционал түрі	Тор параметрі (Å)	Энергия (эВ)
CrNiSb	C _{1b}	GGA	6,040	-73,526
CrNiSb	C _{1b}	SCAN	5,987	-71,456
CrNiSn	C _{1b}	GGA	6,057	-69,968
CrNiSn	C _{1b}	SCAN	6,011	-69,462

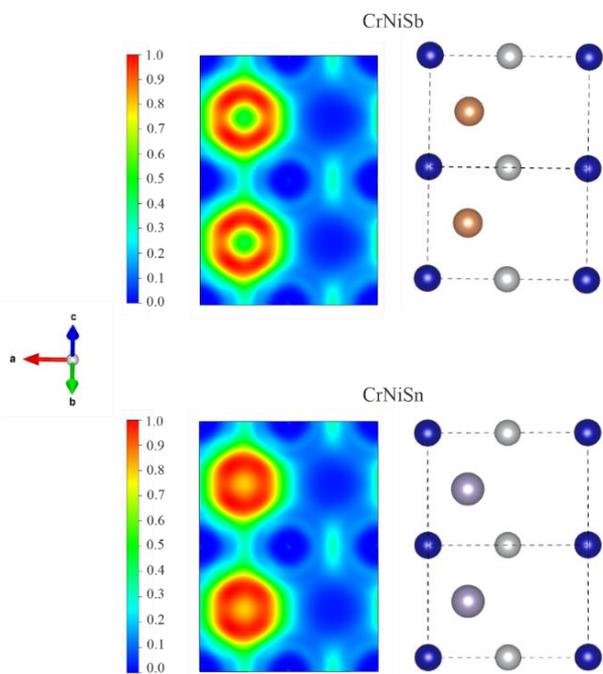
2. ЭЛЕКТРОНДЫҚ ҚАСИЕТТЕРІ

4 – суретте CrNiSb және CrNiSn қорытпалары үшін күйлердің электрондық тығыздықтары (DOS) GGA және SCAN әдістерімен салыстырылып көрсетілген. GGA әдісі арқылы есептелген зерттеулер екі қорытпа үшін де металдық қасиетті көрсетеді. SCAN әдісі арқылы есептелген CrNiSn қорытпасында Ферми деңгейі маңында тығыздық айтарлықтай азаяды, бірақ толық нөлге тең емес, демек бұл әдісте аталған қорытпаның металдық қасиетін көрсетеді. CrNiSb қорытпасы үшін SCAN әдісі күйлердің толық тығыздығы (TDOS) β-күйіндегі псевдосаңылауларын көрсетеді. Псевдосаңылаулар – бұл электрондық күйлердің айтарлықтай төмендеуі немесе болмауы байқалатын, олардың электрондық құрылымдарының бірегей сипаттамаларын көрсететін DOS шеңберіндегі аймақтар. Қорытпаның осындай сипаттамалары энергетикалық тұрғыдан қолайлы конфигурациялары бойынша жартылай металдарға ұқсас электрондық қасиеттерді көрсетеді.

**CrNiZ (Z=Sb, Sn) ЖАРТЫЛАЙ ГЕЙСЛЕР ҚОРЫТПАЛАРЫНЫҢ ҚҰРЫЛЫМДЫҚ
ЖӘНЕ ЭЛЕКТРОНДЫҚ ҚАСИЕТТЕРІН АВ ІНІТІО ЕСЕПТЕУЛЕРІ НЕГІЗІНДЕ ЗЕРТТЕУ**



Сурет 4. CrNiZ (Z=Sb, Sn) жартылай Гейслер қорытпаларының GGA және SCAN әдістері арқылы салыстырылған күйлердің электрондық тығыздықтары



Сурет 5. CrNiZ (Z=Sb, Sn) жартылай Гейслер қорытпалары үшін ELF

CrNiSb және CrNiSn қорытпаларының электрондық локализация функциясы (ELF) олардың электрондық құрылымын түсіну үшін есептелініп, 110 жазықтығында проекциясы 5 суретте көрсетілген. Электрон локализациясының функциясы (ELF) жоғары мәндерге ие аймақтарда электрондар жұптасуға бейім келеді, бұл металаралық қорытпаларда жақын орналасқан атомдар арасындағы коваленттік байланыстардың түзілуін сипаттайды. Cr және Sb арасында коваленттік байланыс бар, бірақ Ni элементі айналасындағы электрон тығыздығы төмен болғандықтан, ол орталық атом ретінде тек өткізгіштік қасиетке әсер етеді. Cr және Sn элементтері арасындағы коваленттік байланыс күштірек және тығыз орналасқан, бұл қорытпаның химиялық тұрақтылығына әсер етеді. CrNiSb қорытпасына қарағанда, CrNiSn қорытпасында коваленттік байланыстардың тығыздығы көбірек байқалады. Бұл қорытпа электрондық локализация көрсеткіштері бойынша Cr және Sn элементтері арасында коваленттік байланыстың күштірек екенін көрсетеді.

2 кесте. CrNiZ (Z=Sb, Sn) жартылай Гейслер қорытпаларының магниттік моменттері (μ_B)

Қорытпа	Функционал түрі	Cr	Ni	Sb	Sn	Толық	С-П ережесі
CrNiSb	GGA	3,271	-0,240	-0,117		2,914	3
	SCAN	3,489	-0,497	-0,114		2,876	
CrNiSn	GGA	3,297	-0,006		-0,128	3,162	2
	SCAN	3,584	-0,176		-0,055	3,353	

3. Магниттік қасиеттері

CrNiSb және CrNiSn Heusler қорытпаларының толық магниттік моменттері (μ_B) SCAN және GGA функционалдары арқылы есептелді. Сонымен қатар, әрбір жеке атомның магниттік моменттері анықталды. Толық магниттік моменттер мен атомдық магниттік моменттердің бұрын есептелген теориялық мәндері 2 кестеде берілген. Біз есептеген CrNiSb қорытпасының толық магниттік моменті шамамен 3 μ_B болды. Бұл Слейтер-Полинг (С-П) ережесіне бағынатынын көрсетеді. Алайда, CrNiSn бұл ережені сақтамады. CrNiSn қорытпасында атомдардың магниттік моменттері С-П ережесінің ауытқуына ықпал етеді. Ni атомының *d*-электрондары әдетте магниттік емес, бірақ көрші атомдармен гибридтену нәтижесінде оның спиндік күйі өзгереді. Sn атомы (Sb-мен салыстырғанда) электртерістілігі жоғарырақ және оның *d*-орбитальдары Cr атомдарымен әлсіз гибридтенеді. Бұл Cr атомының магниттік моментінің азаюына немесе толық өзгеруіне алып келеді. Нәтижесінде, CrNiSn қорытпасының магниттік моменті күтілгеннен ерекшеленеді. С-П ережесінде жартылай Гейслер қорытпаларындағы толық магниттік моментті келесі формула бойынша есептеуге болатындығы есептеледі [31]: $M_t = Z_t - 18$, мұндағы Z_t – бірлік ұяшықтағы валенттік электрондарының жалпы саны және M_t – бірлік ұяшықтағы магниттік момент.

Қорытынды

Қорытындылай келе, тығыздық функционалы теориясы (DFT) негізінде жүргізілген зерттеу CrNiZ (Z = Sb, Sn) жартылай Гейслер қорытпаларының электрондық және магниттік қасиеттерін тереңірек түсінуге мүмкіндік берді. Жалпыланған градиентті жуықтау (GGA) және мета-GGA (SCAN) алмасу-корреляциялық функционалдарын қолдану нәтижелері CrNiSb қорытпасының жартылай металлдық қасиеттерін, ал CrNiSn қорытпасының толық металлдық сипатын анық көрсетті. Сонымен қатар, мета-GGA (SCAN) функционалы зерттелген қорытпалардың электрондық құрылымын сипаттауда дәлірек әдіс ретінде танылды. CrNiSb қорытпасының магниттік моменті 3 μ_B -ке тең болып, Слейтер-Полинг ережесіне толық сәйкес келуі оның ерекше магниттік қасиеттерін айқындады. Бұл зерттеу CrNiZ қорытпаларының болашақта функционалдық материалдар ретінде қолданылу мүмкіндігін көрсетеді.

Қазақстан Республикасы Ғылым және жоғары білім министрлігінің AP22683528 «Гейслер қорытпаларына негізделген термоэлектрлік және спинтрондық материалдардың компьютерлік дизайны» грантының қаржылық қолдауымен орындалды.

ӘДЕБИЕТТЕР / REFERENCES

- Gilleßen M., Dronskowski R. A combinatorial study of full Heusler alloys by first-principles computational methods // Journal of computational chemistry. – 2009. – Vol. 30, Issue 8. – P. 1290–1299.
- Galanakis I. Appearance of half-metallicity in the quaternary Heusler alloys // Journal of Physics: Condensed Matter. – 2004. – Vol. 16, Issue 18. – P. 3089.
- Zhang M. et al., Half-metallic ferromagnetism in hypothetical semi-Heusler alloys NiV M (M= P, As, Sb, S, Se, and Te) // Journal of applied physics. – 2004. – Vol. 95, Issue 11. – P. 7219–7221.
- Shishidou T., Freeman A., Asahi R. Effect of GGA on the half-metallicity of the itinerant ferromagnet CoS₂ // Physical Review B. – 2001. – Vol. 64, Issue 18. – P. 180401.
- Galanakis I. Surface half-metallicity of CrAs in the zincblende structure // Physical Review B. – 2002. – Vol. 66, Issue 1. – P. 012406.
- Stroppa A. et al. Electronic structure and ferromagnetism of Mn-doped group-IV semiconductors // Physical Review B, – 2003. – Vol. 68, Issue 15. – P. 155203.
- Kusakabe K. et al. New half-metallic materials with an alkaline earth element // Journal of Physics: Condensed Matter. – 2004. – Vol. 16, Issue 48. – P. S5639.
- Kandpal H.C. et al. Electronic structure, magnetism and disorder in the Heusler compound Co₂TiSn // Journal of Physics D: Applied Physics. – 2007. – Vol. 40, Issue 6. – P. 1587.
- Miura Y., Nagao K., Shirai M. Atomic disorder effects on half-metallicity of the full-Heusler alloys Co₂(Cr_{1-x}Fe_x)Al: A first-principles study // Physical Review B. – 2004. – Vol. 69, Issue 14. – P. 144413.
- Fecher G.H. et al. Slater-Pauling rule and Curie temperature of Co₂-based Heusler compounds // Journal of applied physics. – 2006. – Vol. 99, Issue 8. – P. 08J106-1–08J106-9.
- Lenssen, K.-M.H. Magnetoresistive Sensors and Memory // In book: Frontiers of Multifunctional Nanosystems. – Dordrecht, 2002. – P. 431–452.
- Caballero J. et al. Magnetoresistance of NiMnSb-based multilayers and spin valves // Journal of Vacuum Science & Technology A: Vacuum, Surfaces, and Films. – 1998. – Vol. 16, Issue 3. – P. 1801–1805.
- Hordequin C., Nozieres J., Pierre J. Half metallic NiMnSb-based spin-valve structures // Journal of magnetism and magnetic materials. – 1998. – Vol. 183, Issue 1-2. – P. 225–231.
- Zhang Y., Wang W. et al. Structure and magnetic properties of Fe₂NiZ (Z=Al, Ga, Si and Ge) Heusler alloys // Physica B Condensed Matter. – 2013. – Vol. 420. – P. 86–89.
- Midhunlal P. et al. Near total magnetic moment compensation with high Curie temperature in Mn₂V_{0.5}Co_{0.5}Z (Z=

- Ga, Al) Heusler alloys // Journal of Physics D: Applied Physics. – 2018. – Vol. 51, Issue 7. – P. 075002-1-075002-10.
16. Perdew J.P., Burke K., Ernzerhof M. Generalized gradient approximation made simple // Physical review letters. – 1996. – Vol. 77, Issue 18. – P. 3865–3868.
17. Kresse G., Furthmüller J. Efficiency of ab-initio total energy calculations for metals and semiconductors using a plane-wave basis set // Computational materials science. – 1996. – Vol. 6, Issue 1. – P. 15–50.
18. Kresse G., Furthmüller J. Efficient iterative schemes for ab initio total-energy calculations using a plane-wave basis set // Physical review B. – 1996. – Vol. 54, Issue 16. – P. 11169–11186.
19. Kresse G., Joubert D. From ultrasoft pseudopotentials to the projector augmented-wave method // Physical review b. – 1999. – Vol. 59, Issue 3. – P. 1758
20. Manz T.A., Limas N.G. Introducing DDEC6 atomic population analysis: part 1. Charge partitioning theory and methodology // RSC advances. – 2016. – Vol. 6, Issue 53. – P. 47771–47801.
21. Abuova F. et al. Structural, Electronic and Magnetic Properties of $Mn_2Co_{1-x}V_xZ$ (Z= Ga, Al) Heusler Alloys: An Insight from DFT Study // Magnetochemistry. – 2021. – Vol. 7, Issue 12. – P. 159-1–159-12.
22. Абуова Ф. и др. Структурные, электронные и магнитные свойства Mn_2CoZ (Al/Ga) при легировании ванадием // Известия НАН РК. – 2021. – № 5. – С. 6–16. [Abuova F. i dr. Strukturnye, elektronnyye i magnitnyye svoystva Mn_2CoZ (Al/Ga) pri legirovanii vanadiem // Izvestiya NAN RK. – 2021. – No. 5. – P. 6–16. (In Russ..)]
23. Абуова Ф. и др. Электронная структура, магнитные свойства и стабильность сплавов Гейслера $Mn_2Co_{1-x}V_xZ$ (Z= Al, Ga) // Вестник НЯЦ РК. – 2020. – № 4. – С. 24–28. <https://doi.org/10.52676/1729-7885-2020-4-24-28> [Abuova F.U., Inerbayev T.M., Abuova A.U., Kaptagay G.A., Merali N.A., Soltanbek N. Electronic structure, magnetic properties and stability of Heusler alloys $Mn_2Co_{1-x}V_xZ$ (Z = Al, Ga) // NNC RK Bulletin. – 2020. – Vol. 4. – P. 24–28. (In Russ..)]
24. Abuova A., Merali N., Abuova, F. et al. Electronic Properties and Chemical Bonding in V_2FeSi and Fe_2VSi Heusler Alloys // Crystals. – 2022. – Vol. 12, Issue 11. – P. 1546-1-1546-13.
25. Merali N.A., Soltanbek N.S., Abuova F.U., Inerbaev T.M., Nurkenov S.A., Abuova A.U. First-principles studies of X_2FeSi Heusler alloys // NNC RK Bulletin. – 2023. – No. 2. – P. 66–73. <https://doi.org/10.52676/1729-7885-2023-2-66-73>
26. Draganyuk O.N., Zhandun V.S., Zamkova N.G. Half-metallicity in Fe_2MnSi and Mn_2FeSi heusler compounds: A comparative ab initio study // Materials Chemistry and Physics. – 2021. – Vol. 271. – P. 124897-1–124897-87.
27. Savin A. et al. ELF: The electron localization function // Angewandte Chemie International Edition in English. – 1997. – Vol. 36, Issue 17. – P. 1808–1832.
28. Seredina M. et al. Magnetic and transport properties of as-prepared Mn_2CoGa // Journal of Magnetism and Magnetic Materials. – 2019. – Vol. 470. – P. 55–58.
29. Ghimire M. P. et al. First principles study of the electronic and magnetic properties of semi-Heusler alloys $NiXSn$ (X= Ti, V, Cr and Mn) // Journal of alloys and compounds. – 2011. – Vol. 509. – No. 41. – P. 9742–9752.
30. Kulkova S. E. et al. The electronic structure and magnetic properties of full-and half-Heusler alloys // Materials transactions. – 2006. – Vol. 47. – No. 3. – P. 599–606.
31. Al-zyadi J. M. K., Gao G. Y., Yao K. L. First-principles investigation of the structural and electronic properties of bulk full-Heusler alloy Mn_2CoSn and its (0 0 1) surface // Journal of alloys and compounds. – 2013. – Vol. 565. – P. 17–21.

ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРНЫХ И ЭЛЕКТРОННЫХ СВОЙСТВ ПОЛУГЕЙСЛЕРСКИХ СПЛАВОВ CrNiZ (Z=Sb, Sn) НА ОСНОВЕ РАСЧЕТОВ АВ ІНІТІО

**Н. С. Солтанбек¹, Н. А. Мерәлі^{1*}, А. У. Абуова¹, Ф. У. Абуова¹, Ж. Е. Зәкиева²,
Ө. К. Әбдірашев¹, А. Б. Базарбек¹, Г. Д. Кабдрахимова¹, Т. М. Инербаев¹**

¹⁾ Евразийский национальный университет им. Л.Н. Гумилева, Астана, Казахстан

²⁾ Международный университет Астана, Астана, Казахстан

* E-mail для контактов: nurreis.93@mail.ru

В этой статье электронные и магнитные свойства полуГейслерских сплавов CrNiZ (Z = Sb, Sn) были исследованы квантово-химическим методом на основе теории функционала плотности (DFT). В расчетах использовались обобщенные градиентные аппроксимации (GGA) и обменно-корреляционные функционалы мета-GGA (SCAN). Согласно полученным результатам, было обнаружено, что в то время как сплав CrNiSb проявляет полуметаллический характер, сплав CrNiSn имеет металлический характер. Функционал Мета-GGA (SCAN) был выбран в качестве метода более точного описания электронной структуры сплавов CrNiZ. Кроме того, было обнаружено, что магнитный момент сплава CrNiSb равен 3 μ_B , что соответствует правилу Слейтера-Полинга.

Ключевые слова: теория функционала плотности, полуметалл, сплавы Гейслера, электронные свойства, плотность состояний, функция электронной локализации.

INVESTIGATION OF THE STRUCTURAL AND ELECTRONIC PROPERTIES
OF HALF-HEUSLER ALLOYS CrNiZ (Z=Sb, Sn) BASED ON AB INITIO CALCULATIONS

N. S. Soltanbek¹, N. A. Merali^{1*}, A. U. Abuova¹, F. U. Abuova¹, Z. Y. Zakiyeva²,
O. K. Abdirashev¹, A. B. Bazarbek¹, G. D. Kabdrakhimova¹, T. M. Inerbaev¹

¹⁾ L. N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, Kazakhstan

²⁾ Astana International University, Astana, Kazakhstan

* E-mail for contacts: nurpeis.93@mail.ru

In this article, the electronic and magnetic properties of half-Heusler alloys CrNiZ (Z = Sb, Sn) were investigated by a quantum chemical method based on density functional theory (DFT). Generalized gradient approximations (GGA) and meta-GGA exchange-correlation functionals (SCAN) were used in the calculations. According to the results obtained, it was found that while the CrNiSb alloy exhibits a half-metallic character, the CrNiSn alloy has a metallic character. The Meta-GGA (SCAN) functional was chosen as a method for a more accurate description of the electronic structure of CrNiZ alloys. In addition, it was found that the magnetic moment of the CrNiSb alloy is 3 μ_B , which corresponds to the Slater-Pauling rule.

Keywords: density functional theory, half-metal, Heusler alloys, electronic properties, density of states, electronic localization function.

<https://doi.org/10.52676/1729-7885-2025-1-96-103>

УДК 535.37:535.34:539.19

LUMINESCENCE AND THE FORMATION OF ELECTRON-HOLE TRAPPING CENTERS IN CaSO_4 -Bi PHOSPHOR

R. K. Shamiveva*, T. N. Nurakhmetov, Z. M. Salikhodzha, T. T. Alibay,
B. M. Sadykova, A. Zh. Kainarbay, K. B. Zhanglyssov, A. S. Nurpeissof

L.N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, Kazakhstan

* E-mail for contacts: rasha_arman@bk.ru

The mechanisms of creation of a new combined electron-emissive state at 2.95 eV, 3.1 eV, 2.6–2.7 eV and 2.25–2.4 eV, which is a pre-decay state for energy transfer from the matrix to the emitters, were investigated in the CaSO_4 -Bi phosphor. Combined electron-emissive states are formed from intrinsic $\text{SO}_4^{3-} - \text{SO}_4^-$ and impurity $\text{Bi}^{2+} - \text{SO}_4^-$ electron-hole trapping centers according to studying via spectroscopic and thermal activation methods. In turn, the intrinsic and impurity electron-hole trapping centers are created during excitation of the anionic complex SO_4^{2-} as a result of charge transfer from the matrix to impurities ($\text{O}^{2-} - \text{Bi}^{3+}$) and neighboring anions ($\text{O}^{2-} - \text{SO}_4^{2-}$). It is shown that the energy accumulated in the intrinsic matrix during external irradiation in the form of a combined electron radiative state of SO_4^{3-} and Bi^{2+} decays as a result of the recombination process and is transferred to impurities.

Keywords: sulfate; electron; recombination emission; intrinsic emission; hole; excitation.

INTRODUCTION

Luminescent properties of alkali halide, alkaline earth oxides, sulfates, phosphates, tungstates, borates and other compounds activated by Bi ions have been studied since the 1960s [1–13]. Phosphors activated by ions Bi^{3+} , Bi^{2+} are used in practice as sources of visible radiation. Phosphors with Bi^{2+} impurities are also used to obtain radiation in the infrared region of the spectrum, which are used in medicine for visualization of human tissue.

According to experimental data, Bi^{3+} and Bi^{2+} ions in phosphors emit in the ultraviolet, visible, and infrared regions of the spectrum. In the studies by authors [14–16], emissions were observed at 4.08–4.09 eV in $\text{La}_3\text{Al}_5\text{O}_{12} - \text{Bi}$, $\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12} - \text{Bi}$ and $\text{Lu}_2\text{SiO}_5 - \text{Bi}$ at low temperatures $T < 100$ K. The authors suggest that the appearance of ultraviolet emission is associated with the transition of an electron from a metastable $3p_0$ level to the ground state. As the temperature increases $T > 100$ K, this emission fades.

The authors in [17] observed ultraviolet emission spectra at 242 nm (5.1 eV) in the $\text{YPO}_4 - \text{Bi}$ phosphor at room temperature, excited by 227 nm (5.4 eV). The emission band at 242 nm (5.1 eV) is attributed to intra-center emission from the Bi^{3+} ion. Visible emission associated with the electronic transition $3p_1 \rightarrow 1s_0$ in the Bi^{3+} ion has been investigated in the works of authors [14–16] across various phosphors.

In the work [18], it was shown that the appearance of a broad emission band at 448 nm (2.75 eV) in the $\text{CaSnO}_3 - \text{Bi}^{3+}$ phosphor is associated with the $3p_1 \rightarrow 1s_0$ transition in Bi^{3+} , which is excited by photon energies of 262 nm and 308 nm (4.02 eV). The authors suggest that the 448 nm (2.75 eV) emission is excited as a result of charge transfer from the matrix ($\text{O}^{2-} - \text{Bi}^{3+}$) to the Bi^{3+} centers.

Visible emissions at 377 nm (3.3 eV) and 390 nm (3.2 eV) were observed in the $\text{CaO} - \text{Bi}$ phosphor when excited by of 300 nm (4.1 eV) and 354 nm (3.5 eV), as reported by the authors in [19]. Numerous experimental studies have demonstrated that the ground state of the Bi^{3+} ion is located above the valence band within the transparency region of the phosphor matrix at the $1s_0$ level, while the excited state is $6s^1 6p^1$.

Absorption bands associated with transitions $1s_0 3p_1$ and $1s_0 1p_1$ have been identified in the spectral range of 250–400 nm (3.1–4.9 eV). Intra-center emission of Bi^{3+} arises from the decay of the excited $3p_0$ and $3p_1$ states, which may be mixed depending on the matrix temperature.

In contrast to Bi^{3+} emission, the luminescence of Bi^{2+} (with the $6s^2 6p^1$ configuration) is less studied due to its instability. Bi^{2+} luminescence is attributed to an intra-configurational p-p transition, which is forbidden by parity rules. Due to spin-orbit coupling in the electronic configuration of the Bi^{2+} ion, with a configuration of $6s^2 6p^1$, the Bi^{2+} ion splits into a ground state $2p_{1/2}$ and an excited state $2p_{3/2}$.

The study by the authors [20] demonstrated that the luminescent material $\text{CaAl}_4\text{O}_4 - \text{Bi}$ exhibits emission from Bi^{2+} in the deep red and near-infrared regions (720–850 nm), associated with the $2p_{3/2} \rightarrow 2p_{1/2}$ transition. It was established that this luminescence is dominant in radioluminescence and thermoluminescence spectra. Such phosphors are widely used in biomedicine.

In the phosphor $\text{CaF}_2 - \text{Bi}$, photoluminescence has been observed in the energy range of 380–800 nm, corresponding to the $2p_{3/2} \rightarrow 2p_{1/3}$ transition, which is excited by 266 nm [21].

The work by the authors [22] identified infrared emissions at 627 nm (1.9 eV), which are excited in the

spectral regions of 260 nm (4.7 eV), 452 nm (2.75 eV), and 592 nm (2.09 eV). It is suggested that in BaSO_4 , the Bi^{2+} ion is responsible for the emission at 627 nm (1.9 eV), which is excited by the transition of electrons from the ground state $2p_{1/2} \rightarrow 2s_{1/2}$ (260 nm) to the excited state $2p_{1/2} \rightarrow 2p_{3/2}$ (452 nm).

Thus, in phosphors activated by Bi ions, excitation by ionizing radiation leads to emissions in the ultraviolet, visible, and infrared spectral regions. The resulting energy of intrinsic electronic excitations is transformed to the emitter through the mechanisms described above. In the present work, the possibility of transforming the energy of electronic excitations to emitters through the formation of intrinsic and impurity trapping centers is considered in the $\text{CaSO}_4\text{-Bi}$ phosphor.

METHODS

The samples under investigation were prepared using a wet chemical synthesis method. High-purity powders of CaSO_4 and Bi_2O_3 were used in the synthesis process. Initially, CaSO_4 and Bi_2O_3 (with a 0.2% g/mol impurity concentration) were thoroughly mixed and dissolved in concentrated H_2SO_4 (3–4 drops). The resulting solution was then evaporated at a temperature of 250 °C. After the evaporation of the acid, the powder was washed with double distilled water and subsequently dried at 70 °C. The final powders were pressed into tablets with a diameter of 8–9 mm and a thickness of 1–2 mm.

The structure and purity of the samples were monitored using microscopic and energy-dispersive elemental analysis techniques. The analyses were conducted using an energy-dispersive X-ray spectrometer (EDS) and a scanning electron microscope (SEM). Specifically, a Hitachi TM4000Plus II SEM was employed, paired with a BRUKER EDS system. The SEM operated at an accelerating voltage of 10 kV. X-ray diffraction (XRD) analysis was performed using a D6 PHASER diffractometer (BRUKER).

Photoluminescence characteristics were measured with a Solar SM2203 spectrofluorimeter (Belarus) which has a spectral resolution of 0.3 nm. Low-temperature investigations (down to 77 K) and temperature-dependent studies were conducted using a thermoactivation setup, which included a cryostat with three quartz windows and one beryllium oxide window, monochromators for excitation and detection (from OKB “Spektr MDR-41” and MDR-23U, respectively), and a photomultiplier tube (Hamamatsu 1P28). The system was evacuated to a pressure of 10^{-2} Pa and cooled using liquid nitrogen. To account for potential measurement uncertainties, the spectral resolution of the system was taken into consideration when analyzing the emission linewidths and peak positions. The uncertainty in wavelength calibration was estimated to be within ± 0.5 nm, and the signal-to-noise ratio was optimized by adjusting the slit widths and integration times. Additionally, background signal

subtraction and dark noise corrections were performed to enhance the accuracy and reliability of the obtained spectra.

RESULTS

SEM images reveal particles of varying sizes in the $\text{CaSO}_4\text{-Bi}$ powder. The overall image indicates the presence of large particles ranging from 9 to 18 μm and smaller particles ranging from 0.1 to 2 μm (Figure 1).

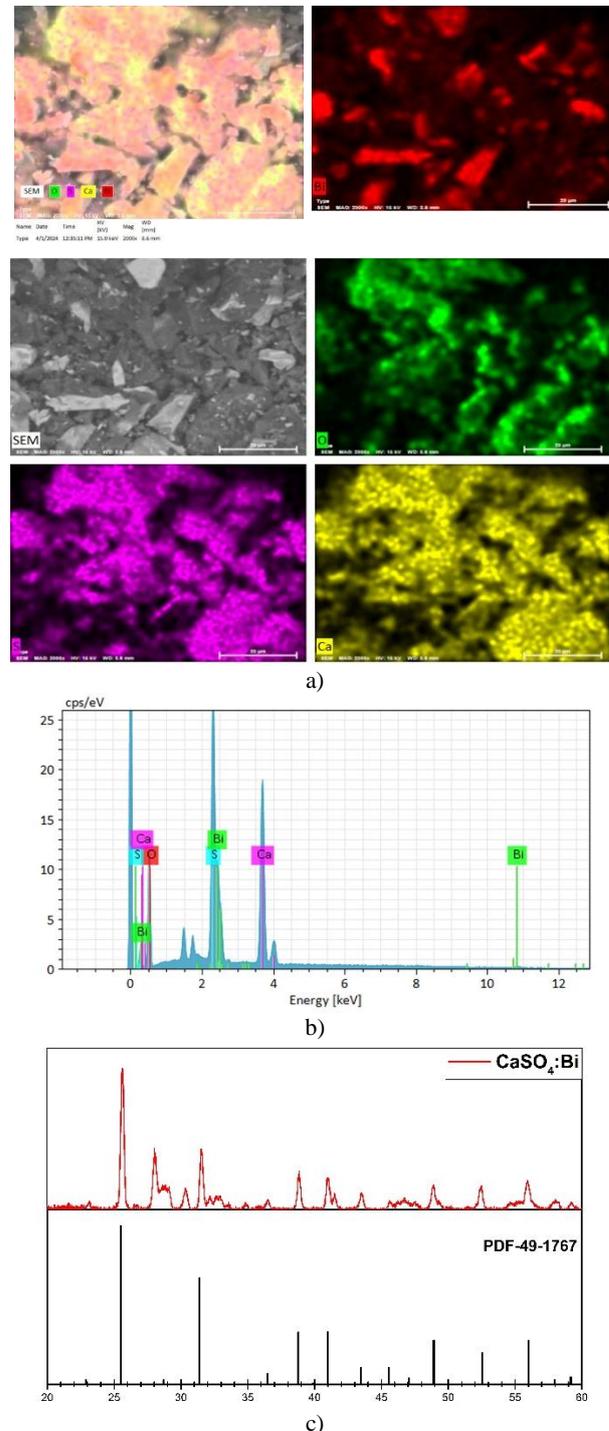


Figure 1. SEM (a), EDS (b) and XRD (c) images of the $\text{CaSO}_4\text{-Bi}$ phosphor

The images also show that the impurity components of the powder appear brighter than the main substance. This difference in brightness is due to the difference in atomic numbers between the Bi impurities and the main CaSO_4 matrix.

Elemental analysis (EDS) confirmed that the sample consists primarily of the CaSO_4 matrix and bismuth impurities, with no other uncontrolled impurities present. Additionally, the XRD pattern corresponds well to the reference PDF 49-1762, confirming the presence of the CaSO_4 phase. The structural analysis further indicates that the sample crystallizes in both tetragonal (P-421c, $a = 7.7314 \text{ \AA}$, $c = 5.6361 \text{ \AA}$) and orthorhombic (Bbmm, $a = 6.2300 \text{ \AA}$, $b = 6.9800 \text{ \AA}$, $c = 6.9700 \text{ \AA}$) modifications, with a calculated density of 2.980 g/cm^3 .

Next step is investigating of the optical properties of the irradiated $\text{CaSO}_4\text{-Bi}$ phosphor.

In the phosphor irradiated with photons possessing energies greater than the [23] bandgap of $\text{CaSO}_4\text{-Bi}$, as in other Bi-activated compounds, ultraviolet, visible, and orange-red emissions are expected to appear.

Figure 2 presents the emission spectra of the $\text{CaSO}_4\text{-Bi}$ phosphor irradiated with an energy of 5.64 eV at temperatures of 300 K and 77 K .

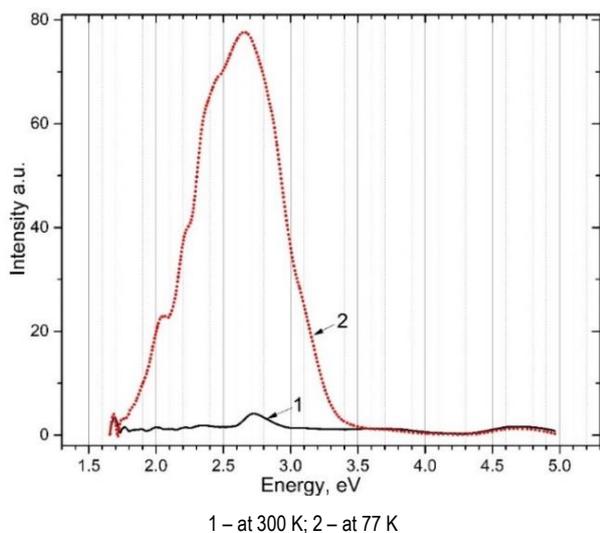


Figure 2. Emission spectra of the $\text{CaSO}_4\text{-Bi}$ phosphor irradiated with an energy of 5.64 eV

From the figure, it can be observed that ultraviolet emissions associated with Bi^{3+} impurities appear in the $4.65\text{--}4.75 \text{ eV}$ range, visible emissions at 2.7 eV , and red-orange emissions at $1.9\text{--}2.03 \text{ eV}$. Similar emission bands have been identified in the works of authors [17, 18, 21–22]. The ultraviolet $\text{CaSO}_4\text{-Bi}$ bands, which are detected at low temperatures $T < 100 \text{ K}$, are associated with electronic transitions from hybrid states $3p_1$ and $3p_0$ to the ground state $1s_0$. The emission bands at 2.7 eV correspond to Bi^{3+} emissions, arising from the $3p_1 \rightarrow 1s_0$ electron transition.

The red-orange emission band around $1.9\text{--}2.03 \text{ eV}$ is attributed to Bi^{2+} ions.

At a temperature of 77 K , after irradiation with photons of the same energy, in addition to the main intracenter emissions, new groups of emission bands appear at 3.1 eV , 2.9 eV , 2.7 eV , 2.6 eV , 2.4 eV , 2.2 eV , and 2.03 eV , 1.92 eV , 1.89 eV . These emission bands can be divided into three groups: the first group, which is the most intense, appears at $2.9\text{--}3.1 \text{ eV}$; the second group of bands appears at $2.6\text{--}2.7 \text{ eV}$; and the third group appears at $2.2\text{--}2.4 \text{ eV}$. These groups of bands have been discussed in the works of authors [23–26] and are associated with recombination emissions that occur due to the recombination of electrons with non-equivalently located localized holes SO_4^- in three crystallographic directions. These recombination emissions correspond to electron-hole trapping centers within the bandgap of the matrix. The emission bands at $1.9\text{--}2.03 \text{ eV}$, as suggested by the authors [22], are likely related to intracenter emission of Bi^{2+} ions in the BaSO_4 matrix.

The appearance of new recombination emission bands is likely related to the interaction of impurities with intrinsic electronic excitations, specifically electron-hole pairs, which arise as a result of charge transfer from an excited anion to impurities [$\text{O}^{2-} \rightarrow \text{Bi}^{3+}$] and to neighboring anions in the matrix [$\text{O}^{2-} \rightarrow \text{SO}_4^{2-}$] [18]. This charge transfer process leads to the formation of electron-hole trapping centers such as Bi^{2+} and SO_4^{3-} . It is well known that in ionic crystals with introduced impurities, electron-hole pairs are more efficiently excited near the impurities. During the excitation of the matrix, a $2p$ oxygen electron from the valence band transitions to the conduction band and is captured by Bi^{3+} impurities, forming the Bi^{2+} ion. The hole generated near the impurity becomes localized above the valence band in the vicinity of the $\text{Bi}^{3+}\text{-SO}_4^-$ complex.

At the final stage, as a result of these relaxation processes, intrinsic $\text{Bi}^{2+}\text{-SO}_4^-$ and impurity $\text{SO}_4^{3-}\text{-SO}_4^-$ electron-hole trapping centers are formed. The decay of these trapping centers in the matrix results in three types of recombination emissions at $2.9\text{--}3.1 \text{ eV}$, $2.6\text{--}2.7 \text{ eV}$, and $2.3\text{--}2.4 \text{ eV}$ [23–26]. In order to clarify the nature of these recombination or tunneling emissions, the excitation spectrum of these emissions were measured.

Figure 3 shows the excitation spectra of the newly formed emission bands at 3.1 eV and 2.9 eV at 77 K (curves 2 and 4, respectively). The figure indicates that these bands are excited by photons with energies of $3.95\text{--}4.1 \text{ eV}$, $4.4\text{--}4.5 \text{ eV}$, $5.15\text{--}5.2 \text{ eV}$, as well as above $5.9\text{--}6.18 \text{ eV}$.

Figure 4 presents the excitation spectra for the newly formed recombination emission bands in the second and third groups at $2.6\text{--}2.7 \text{ eV}$ and $2.25\text{--}2.4 \text{ eV}$ at 77 K (curves 2 and 4, respectively). It is evident that these groups of bands are also excited by photons of $3.0\text{--}3.35 \text{ eV}$, $3.95\text{--}4.1 \text{ eV}$, $4.4\text{--}4.5 \text{ eV}$, and more intensely at $5.15\text{--}5.2 \text{ eV}$.

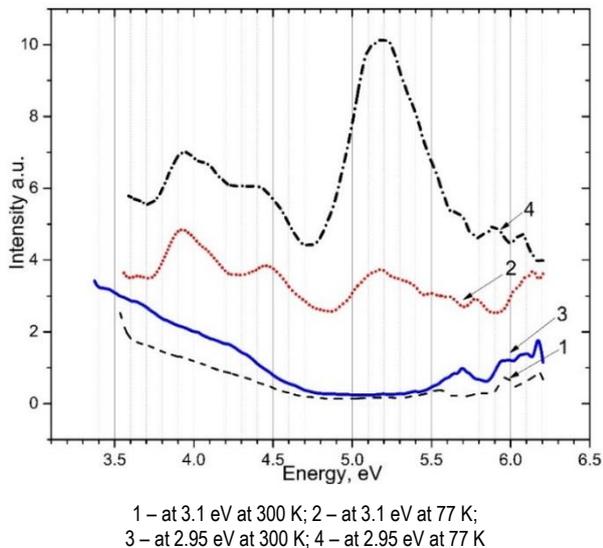


Figure 3. Excitation spectra of $\text{CaSO}_4\text{-Bi}$ at 3.1 eV and 2.9 eV

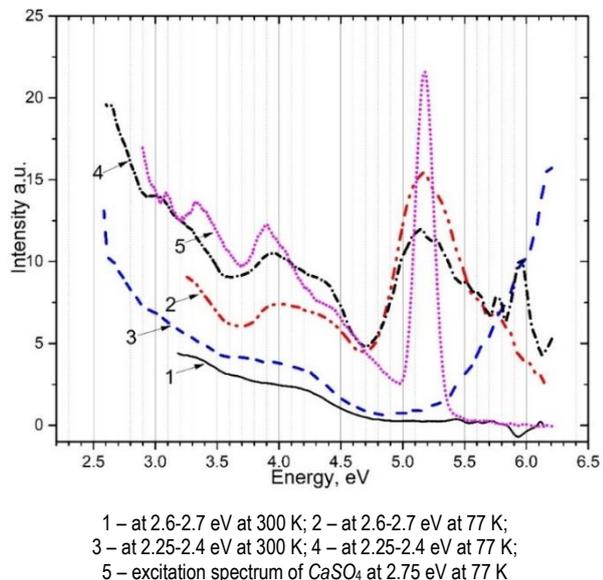


Figure 4. Excitation spectra of $\text{CaSO}_4\text{-Bi}$ at 2.6-2.7 eV and 2.25-2.4 eV

In the same Figure 4, the excitation spectra of the presumed intracenter emission at 2.75 eV at 77 K (curve 5) are also shown. It can be observed that this emission band is effectively excited by photon energies of 5.15–5.2 eV, as well as by 3.95–4.1 eV and 4.4–4.5 eV.

To investigate the interaction between the two groups of recombination emissions and the excitation spectrum at 3.95–4.1 eV and 4.4–4.5 eV at 77 K, it is hypothesized that the appearance of recombination or tunneling emissions is likely connected to the formation of electron-hole trapping centers in $\text{CaSO}_4\text{-Bi}$. These centers are formed during irradiation with photons whose energy exceeds the bandgap, leading to the creation of new electron-hole trapping centers.

The $\text{CaSO}_4\text{-Bi}$ phosphor with induced trapping centers was re-excited by photons with energies of 3.95–4.1 eV and 4.4–4.5 eV at 77 K, resulting in the appearance of recombination emissions.

Figure 5 shows the recombination or tunneling emissions of $\text{CaSO}_4\text{-Bi}$.

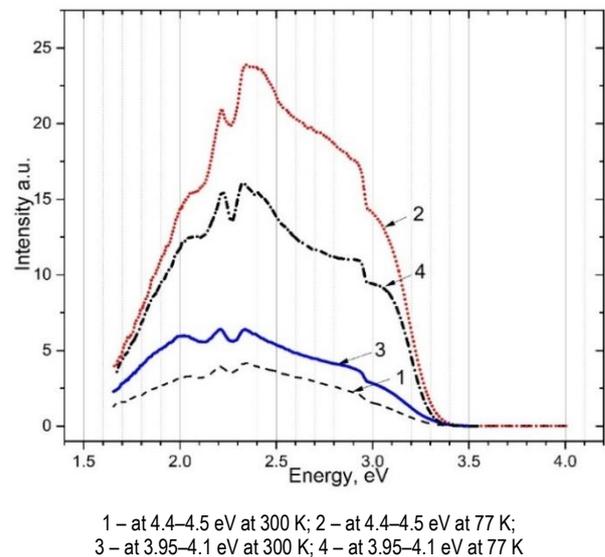


Figure 5. Emission spectra of $\text{CaSO}_4\text{-Bi}$ irradiated with photon energies of 4.4–4.5 eV and 3.95–4.1 eV

From Figure 5 (curves 2 and 4), it is evident that at 77 K, emission bands appear at 2.95–3.1 eV, 2.6–2.7 eV, and 2.25–2.4 eV. Additionally, in the same figure, emissions corresponding to Bi^{2+} ions are observed at 2.03–1.8 eV, which are excited by photons with energies of 3.95–4.1 eV and 4.4–4.5 eV.

It is also important to note that the bands at 2.7–2.75 eV, corresponding to the intracenter emission of Bi^{3+} , are excited at these energies (curve 5).

Figure 6 presents the excitation spectra for the emission bands at 2.03–1.9 eV corresponding to Bi^{2+} ions in the $\text{CaSO}_4\text{-Bi}$ phosphor. From the figure, it is clear that these bands are excited by photon energies of 2.2–2.4 eV, 2.6–2.75 eV, 2.95–3.1 eV, and above 5.1–6.2 eV.

To clarify the nature of the new recombination emissions, the intensity of these emissions was measured as a function of temperature (77–450 K) under excitation by photons with an energy of 5.64 eV. This energy was found to be optimal for generating all observed emission bands.

Figure 7 shows the temperature dependence of the intensity of the main recombination emission bands at 3.1 eV and 2.9 eV, as well as the intracenter emissions of Bi^{3+} and Bi^{2+} impurities at 2.75 eV and 1.9 eV, in the $\text{CaSO}_4\text{-Bi}$ phosphor. The figure indicates that the intensity of the recombination emissions at 3.1 eV and 2.95 eV, as well as the intracenter emissions at 2.75 eV and 1.9 eV, gradually decreases over the temperature range from 100 K to 250 K.

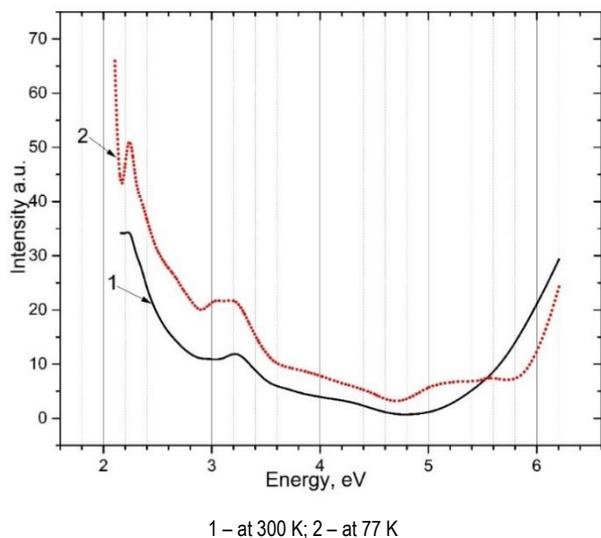


Figure 6. Excitation spectra of $\text{CaSO}_4\text{-Bi}$ at 2.03–1.9 eV

In the temperature range of 250–330 K, the emissions at 3.1 eV, 2.95 eV, and 2.75 eV exhibit a marked increase in intensity before monotonically decreasing to minimal levels. The observed increase in emission intensity is likely associated with an intense process of emission band decay.

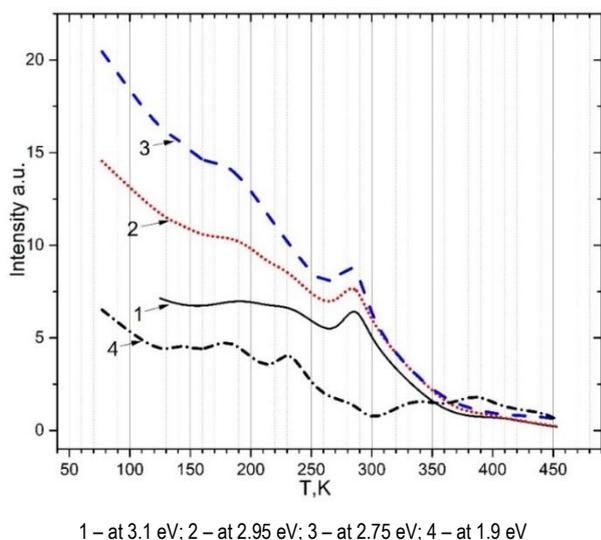


Figure 7. Temperature dependence in the $\text{CaSO}_4\text{-Bi}$ phosphor

DISCUSSION

The primary objective of this study is to establish the regularity of energy transfer from the matrix to the emitters, specifically demonstrating that energy transfer occurs through the formation of intrinsic and impurity electron-hole trapping centers. Based on the experimental data obtained, it is hypothesized that the new groups of recombination emission bands at 3.1 eV, 2.95 eV, 2.6–2.7 eV, and 2.2–2.4 eV are generated upon irradiation with photons whose energy exceeds the bandgap of the

matrix, resulting in the creation of electron-hole pairs. The trapping centers that generate emissive electronic states are formed when free electrons are captured by impurities or anionic complexes, according to the reactions $\text{Bi}^{3+} + e^- \rightarrow \text{Bi}^{2+}$ [17, 19, 22] and $\text{SO}_4^{2-} + e^- \rightarrow \text{SO}_4^{3-}$ [27]. These electron trapping centers, Bi^{2+} and SO_4^{3-} , can be created as a result of charge transfer from the excited anionic complex SO_4^{2-} to impurities such as Bi^{3+} or to anions such as, following the reactions ($\text{O}^{2-} - \text{Bi}^{3+}$) or ($\text{O}^{2-} - \text{SO}_4^{2-} \text{SO}_4^{2-}$).

The hole component formed during the transition of an electron to the conduction band is expected to localize above the valence band as a radical, SO_4^- .

Thus, the created electron trapping centers form, with their complementarily localized holes SO_4^- , intrinsic $\text{SO}_4^{3-} - \text{SO}_4^-$ and impurity $\text{Bi}^{2+} - \text{SO}_4^-$ trapping centers. The electron components of the trapping centers Bi^{2+} and SO_4^{3-} , located below the conduction band, create induced or combined electronic emissive states, which are localized in the transparency region of the matrix, complementarily with the hole states located above the valence band.

When electrons from the combined electronic emissive state recombine with hole components, new bands of recombination emissions appear at 3.1 eV, 2.95 eV, 2.6–2.75 eV, and 2.2–2.4 eV. These electron-hole emissive states are excited by photon energies of 4.4–4.5 eV and 3.9–4.1 eV, primarily at 77 K.

Another important aspect is the experimental detection of the presence of both impurity and intrinsic electronic states in the pair within the combined electronic emissive state. This is evidenced by the measurement of the temperature dependence of the intensity of intrinsic recombination emissions at 3.1 eV and 2.95 eV, along with impurity intracenter emissions of Bi^{3+} and Bi^{2+} . These findings support the idea that both impurity and intrinsic electronic states coexist in the combined emissive states, contributing to the observed luminescence behavior.

From Figure 7, it is evident that the intensity of both intrinsic and recombination emissions at 3.1 eV and 2.95 eV, as well as the intracenter emissions at 2.75 eV and 2.03–1.9 eV, decreases monotonically up to temperature of 250 K. In the temperature range of 250–330 K, the recombination emissions at 3.1 eV and 2.95 eV, along with the intracenter emissions of Bi^{3+} at 2.75 eV, increase sharply, followed by a decrease to a minimal value at 450 K. The intensity of the intracenter emission of Bi^{2+} significantly decreases within this temperature range.

In this temperature range, the combined emissive states undergo decomposition. The band diagram shows that the ionization energy of the electronic emissive states Bi^{2+} and SO_4^{3-} is proportional to $kT \approx 250\text{--}330$ K, with a maximum at around 300 K (where Eu represents the

14. Babin, V., et al. Origin of Bi³⁺-related luminescence centres in Lu₃Al₅O₁₂: Bi and Y₃Al₅O₁₂: Bi single crystalline films and the structure of their relaxed excited states // Physica status solidi (b). – 2012. – Vol. 249.5. – P. 1039–1045.
15. Gorbenko V. et al. Photoluminescence and excited state structure of Bi³⁺-related centers in Lu₂SiO₅: Bi single crystalline films // Journal of luminescence. – 2013. – Vol. 134. – P. 469–476.
16. Awater, Roy HP, Louise C. Niemeijer-Berghuijs, and Pieter Dorenbos. Luminescence and charge carrier trapping in YPO₄: Bi // Optical Materials. – 2017. – Vol. 66. – P. 351–355.
17. Cao, Renping, et al. Synthesis and luminescence properties of CaSnO₃: Bi³⁺ blue phosphor and the emission improvement by Li⁺ ion // Luminescence. – 2017. – Vol. 32.6. – P. 908–912.
18. Yousif, A., et al. Luminescence and electron degradation properties of Bi doped CaO phosphor // Applied Surface Science. – 2015. – Vol. 356. – P. 1064–1069.
19. Puchalska, M., E. Zych, and P. Bolek. Luminescences of Bi³⁺ and Bi²⁺ ions in Bi-doped CaAl₄O₇ phosphor powders obtained via modified Pechini citrate process // Journal of Alloys and Compounds. – 2019. – Vol. 806. – P. 798–805.
20. Cao, Renping, et al. Yellow-to-orange emission from Bi²⁺-doped RF 2 (R= Ca and Sr) phosphors // Optics express. – 2013. – Vol. 21.13. – P. 15728–15733.
21. Cao, Renping, Mingying Peng, and Jianrong Qiu. Photoluminescence of Bi²⁺-doped BaSO₄ as a red phosphor for white LEDs // Optics express. – 2012. – Vol. 20.106. – P. A977–A983.
22. Nurakhmetov, T. N., et al. Intrinsic emission and electron-hole trapping centers in irradiated Na₂SO₄ // Optik. – 2021. – Vol. 242. – P. 167081.
23. Nurakhmetov, Turlybek N., et al. Energy Transfer in the C a SO₄-Dy Thermoluminescent Dosimeter from the Excited State of the SO₄²⁻ Anionic Complex to the Impurities // Crystals. – 2023. – Vol. 13.11. – P. 1596.
24. Nurakhmetov, T. N., et al. The creation spectra of intrinsic emission of a LiKSO₄ crystal irradiated by ultraviolet photons // Optik. – 2019. – Vol. 185. – P. 156–160.
25. Nurakhmetov, T. N., et al. The energy transfer of electronic excitations to impurities in dosimetric phosphors BaSO₄-Dy // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms. – 2024. – Vol. 555. – P. 165459.
26. Byberg, J. R. O⁻ detected by ESR as a primary electron-excess defect in x-irradiated K₂SO₄ // The Journal of chemical physics. – 1986. – Vol. 84.11. – P. 6083–6085.
27. Nurakhmetov T. N. et al. Specific Features of Formation of Electron and Hole Trapping Centers in Irradiated CaSO₄-Mn and BaSO₄-Mn // Crystals. – 2023. – Vol. 13. – No. 7. – P. 1054.

CaSO₄-Bi ФОСФОРДАҒЫ ЛЮМИНЕСЦЕНЦИЯ ЖӘНЕ ЭЛЕКТРОНДЫҚ КЕМТІКТЕРДІ ҚАРМАУ ОРТАЛЫҚТАРЫНЫҢ ҚАЛЫПТАСУЫ

Р. К. Шамиева*, Т. Н. Нурахметов, Ж. М. Салиходжа, Т. Т. Әлібай,
Б. М. Садыкова, А. Ж. Қайнарбай, К. Б. Жаңылысов, А. С. Нурпеисов

Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Астана. Қазақстан

* Байланыс үшін E-mail: rasha_arman@bk.ru

CaSO₄ – Bi люминофорында 2,95 эВ, 3,1 эВ, 2,6–2,7 эВ және 2,25–2,4 эВ энергия деңгейлерінде жаңа аралас электронды-кемтіктік күйдің түзілу механизмдері зерттелді, бұл күй матрицамен сәулелендіргіштер арасында энергияны беру алдындағы күй болып табылады.

Комбинацияланған электронды-кемтіктік күйлер $SO_4^{3-} - SO_4^-$ және қоспалы $Bi^{2+} - SO_4^-$ электронды-кемтіктік қармау орталықтарынан спектроскопиялық және жылулық активация әдістерімен зерттеулер негізінде қалыптасады. Өз кезегінде, өздік және қоспалы электронды-кемтіктік қармау орталықтары SO_4^{2-} анионды кешенін қоздырған кезде, матрицадан қоспаларға ($O^{2-} - Bi^{3+}$) және көршілес аниондарға ($O^{2-} - SO_4^{2-}$) заряд тасымалдануы нәтижесінде түзіледі.

Сыртқы сәулелену кезінде өздік матрицада жинақталған энергия SO_4^{3-} және Bi^{2+} электронды-сәулелендіргіш біріктірілген күйі түрінде рекомбинация процесі арқылы ыдырап, қоспаларға берілетіні көрсетілді.

Түйін сөздер: *сульфат; электрон; рекомбинациялық эмиссия; меншікті эмиссия; тесік; қозу.*

**ЛЮМИНЕСЦЕНЦИЯ И ОБРАЗОВАНИЕ ЭЛЕКТРОННО-ДЫРОЧНЫХ ЦЕНТРОВ ЗАХВАТА
В ЛЮМИНОФОРЕ $\text{CaSO}_4\text{-Bi}$**

Р. К. Шамиева*, Т. Н. Нурахметов, Ж. М. Салиходжа, Т. Т. Алибай,
Б. М. Садыкова, А. Ж. Кайнарбай, К. Б. Жанылысов, А. С. Нурпеисов

Евразийский национальный университет имени Л.Н.Гумилева, Астана, Казахстан

* E-mail для контактов: rasha_arman@bk.ru

В люминофоре $\text{CaSO}_4 - \text{Bi}$ исследованы механизмы создания нового комбинированного электронно-дырочного состояния при 2,95 эВ, 3,1 эВ, 2,6–2,7 эВ и 2,25–2,4 эВ, которое является предраспадным состоянием для передачи энергии от матрицы к излучателям.

По данным исследования спектроскопическими методами и методами термической активации комбинированные электронно-дырочные состояния формируются из собственных $\text{SO}_4^{3-} - \text{SO}_4^-$ и примесных $\text{Bi}^{2+} - \text{SO}_4^-$ электронно-дырочных центров захвата. В свою очередь, собственные и примесные электронно-дырочные центры захвата создаются при возбуждении анионного комплекса SO_4^{2-} в результате переноса заряда с матрицы на примеси ($\text{O}^{2-} - \text{Bi}^{3+}$) и соседние анионы ($\text{O}^{2-} - \text{SO}_4^{2-}$).

Показано, что энергия, накопленная в собственной матрице при внешнем облучении в виде объединенного электронного излучательного состояния SO_4^{3-} и Bi^{2+} , распадается в результате процесса рекомбинации и передается примесям.

Ключевые слова: сульфат; электрон; рекомбинационная эмиссия; собственная эмиссия; дырка; возбуждение.

<https://doi.org/10.52676/1729-7885-2025-1-104-112>
УДК 621.039.58

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ СТАРЕНИЯ КОРИУМА

Ю. Ю. Бакланова¹, О. С. Букина^{1,2*}, В. В. Бакланов¹

¹ Филиал «Институт атомной энергии» РГП НЯЦ РК, Курчатов, Казахстан

² НАО «Университет имени Шакарима города Семей», Семей, Казахстан

* E-mail для контактов: bukina@nnc.kz

На сегодняшний день исследования кориума представляют собой один из главных вопросов в рамках повышения ядерной безопасности и является одной из задач проведения успешной процедуры устранения последствий аварии с расплавлением активной зоны на АЭС. Одной из важных задач для процедуры устранения последствий аварии на АЭС является понимание физического состояния расплава активной зоны аварийного реактора (кориума) для принятия решений по его извлечению из контаймента и дальнейшему обращению с ним. Сложность оценки структуры и свойств кориума, которые претерпевают изменения в результате охлаждения водой и длительной выдержки в контайменте или ловушке расплава (процесса «старения» кориума), заключается в его высокой радиоактивности.

Кориум включает в себя элементы активной зоны (урановое топливо, циркониевая оболочка), элементы металлических конструкций, конструкционных материалов, бетона и прочее. Известно пять случаев запроектных аварий с образованием кориума: на реакторе АЭС «Three Mile Island-2» (США, 1979 г.), на Чернобыльской АЭС (Украина, 1986 г.) и три случая формирования кориума наблюдалось при аварии на АЭС «Fukushima - 1» (Япония, 2011 г.). Все эти инциденты показали актуальность как усовершенствования систем безопасности на ядерных установках, так и необходимость изучения свойств кориума для проведения работы с ним.

Ввиду высокой радиационной опасности, исследования свойств кориума проводятся на модельных образцах. Модельный кориум в филиале «Институт атомной энергии» РГП НЯЦ РК может быть получен как в лабораторных условиях, так и на экспериментальных стендах института. Свойства кориума различны и зависят от исходного состава шихты (компонентов, моделирующих активную зону и конструкционные материалы) и условий моделирования запроектной аварии (температуры плавления, принципа охлаждения расплава, наличия остаточного энерговыделения, способа удержания расплава и т.д.).

В статье приводятся результаты анализа современных достижений в области исследования кориума, а также методические рекомендации исследования процессов старения кориума, сформированные на основании опыта зарубежных специалистов (Япония, Российская Федерация) [1–4] и собственных многолетних наработок специалистов филиала «Институт атомной энергии» РГП НЯЦ РК.

Методические рекомендации, приведенные в данной статье, могут быть использованы непосредственно для исследования процесса изменения свойств кориума в различных условиях, а также для прогнозирования процесса старения на заданный срок выдержки его в контайменте реакторной установки или подреакторной ловушке расплава.

Ключевые слова: кориум, расплав, запроектная авария, структура, свойства, исследования.

ВВЕДЕНИЕ

Исследования процесса изменения свойств кориума с течением времени (старения) являются основополагающими в вопросах обращения с ним при устранении последствий аварий с расплавлением активной зоны на АЭС [5].

Кориум – лавоподобный материал, образующийся во время тяжелых аварий на ядерном реакторе с расплавлением активной зоны [6, 7]. Кориум включает в себя элементы активной зоны (урановое топливо, циркониевая оболочка), элементы металлических конструкций, конструкционных материалов, бетона и прочее.

Кориум формировался за пределами научно-исследовательских лабораторий лишь пять раз: на реакторе (тип PWR) второго энергоблока АЭС «Three Mile Island» (ТМІ-2) в 1979 году (США), на реакторе РБМК-1000 (тип BWR) Чернобыльской АЭС и триж-

ды – при запроектной аварии на реакторе (тип BWR) АЭС «Fukushima-1» в 2011 году (Япония) [8]. Из пяти случаев формирования кориума только при аварии на Чернобыльской АЭС ядерная лава смогла вырваться за пределы реактора. Для случаев, когда расплав остался внутри контаймента, требуется решение разнообразных задач по определению характеристик кориума на момент извлечения. Возможность прогнозирования процесса старения кориума легководного реактора в различных условиях позволит получить данные для разработки процедур и инструментов для его извлечения, а также - для разработки процедур дальнейшего обращения с ним [5].

В филиале «Институт атомной энергии» (ИАЭ) РГП НЯЦ РК, в рамках научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ (НИОКР) в области разработки систем пассивной безопасности для АЭС с водо-водяными реакторами (ВВР), были реализова-

ны проекты COTELS, COTELS-2, CORMIT, CORMIT-Ph2 [6, 7], «Fukushima Debris», INVECOR. Исследования проводятся с 1997 года и полученный в экспериментах модельный кориум имеет различный возраст, а наибольший составляет более 25 лет.

В настоящей статье обобщен опыт зарубежных ученых и специалистов филиала ИАЭ РГП НЯЦ РК, представлены методические рекомендации и порядок работы с кориумом в рамках материаловедческих исследований для изучения процесса изменений его свойств с течением времени. Результатом работы является список наиболее показательных характеристик кориума и алгоритм, их определения в лабораторных условиях [9].

МЕТОДЫ

Анализ опыта зарубежных исследований

Работы по изучению образцов кориума и расплава аварийной Чернобыльской АЭС ведутся в госкорпорации «Росатом» [8], специалисты таких компаний, как АО «НИКИЭТ» и АО «ИРМ» проводят работу по выбору сценариев извлечения и обращения с радиоактивными цеолитами, проводят первичную оценку безопасности их долгосрочного промежуточного хранения вместе с японскими коллегами [8].

Условия формирования кориума, образовавшегося в результате аварии на втором энергоблоке АЭС «Three Mile Island» (ТМІ-2) и АЭС «Fukushima Daiichi» весьма схожи [5, 10]. Данные, полученные от ТМІ-2 могут быть использованы для разработки системы различных вариантов набора характеристик кориума.

В результате аварий на ТМІ-2 и на АЭС «Fukushima Daiichi» произошло расплавление материалов активной зоны, включая топливные, конструкционные и поглощающие материалы и продукты деления (ПД), что привело к образованию кориума, процент содержания делящихся материалов в котором зависел от месторасположения отдельных его элементов в поврежденной активной зоне [10]. Для обоих случаев, одной из главных задач процедуры устранения последствий аварии являлось определение состава кориума для его эффективного извлечения из поврежденной активной зоны с дальнейшей утилизацией.

В [11] приводятся оценки аварии на ТМІ-2, включая исследование взаимодействия топлива и конструкционных материалов, анализ состава элементов кориума, дозиметрия, оценка структура поврежденной активной зоны реактора и другое. Ценными для данной работы являются данные по исследованию образцов кориума. При формировании системы вариантов модели кориума использовались данные по исследованию взаимодействия материалов АЗ реактора при сверхвысоких температурах [12], данные по графиметрическим исследованиям образцов кориума в зависимости от места пробоотбора в активной зоне [12], а также сборные данные нескольких исследова-

ний образцов кориума с точки зрения металлургии и материаловедения из разрушенной активной зоны ТМІ-2 [13]. На основании данных о количественном содержании урана в частицах кориума, распределении отдельных частиц кориума по размеру, плотности и обогащению формируется представление о типе материала в нижней части корпуса реактора ТМІ-2. Эти данные могут быть использованы в качестве реперной точки для описания кориума, при учёте ряда факторов, отличающих данные параметры для кориума на АЭС «Fukushima Daiichi» и ТМІ-2. Для полноценного анализа параметров кориума ТМІ-2 и формирования более точного описания, необходимо учитывать различие параметров кориума в зависимости от его местоположения в поврежденной активной зоне.

Различие анализируемых параметров в зависимости от местоположения элементов кориума в активной зоне после аварии связано не только с разным уровнем температур в противоположных точках активной зоны, но и с особенностями протекания процесса формирования кориума на этапах расплавления, кристаллизации и растрескивания, что является выводами исследования [14–16].

В обзоре [5] проведен сбор характеристик и параметров элементов кориума, образовавшегося в результате аварии на АЭС «Fukushima Daiichi». На основе анализа результатов исследований образцов кориума, находящихся в открытом доступе, проведена компиляция набора характеристик и параметров, который может быть использован для дальнейшего моделирования кориума с высоким уровнем достоверности и детализации.

Из анализа результатов [17–20] сделаны следующие выводы [5]:

- около 50% элементов кориума состоят из UO_2 (включая продукты деления);

- результаты 2/3 всех расчётов показывают, что около 10% элементов кориума представляет собой различные оксиды циркония, и ещё около 10% состоят из циркония в металлической форме, который был сформирован вследствие быстропротекающих и быстроизменяющихся переходных процессов;

- во всех проведенных расчётах относительное количество оксидов железа в кориуме невелико или почти ничтожно, в то время как процент содержания нержавеющей стали (SS) колеблется от 10% до 30%;

- согласно результатам исследования, в кориуме должно наблюдаться присутствие V_4C_3 , но его количество представляет собой чрезвычайно низкое значение в процентном отношении.

Стоит отметить, что представленные результаты, полученные различными организациями, противоречат друг другу. В связи с этим, при разработке комплекса данных по кориуму необходимо учесть разногласные данные путем формирования системы различных вариантов набора характеристик кориума,

включающую в себя граничные случаи, наиболее отличающиеся друг от друга в ряде параметров.

Влияние условий хранения на характеристики модельных топливосодержащих материалов (кориума) исследовалось группой специалистов из АО «Техснабэкспорт», АО «Радиевый институт им. В. Г. Хлопина», АО «ГНЦ НИИАР» (Госкорпорация «Росатом») [5]. Были изготовлены образцы силикатсодержащих топливных обломков (на основе характеристик топливных обломков, образовавшихся после аварии на АЭС «Fukushima Daiichi») и исследовались их свойства в процессе старения в трех средах (в воздушной среде, в воде, в парах воды). Созданная в результате исследований математическая модель позволяет прогнозировать поведение материалов при извлечении, транспортировке и хранении с дискретным шагом в 10, 20, 30 и 50 лет.

Проведенные эксперименты показали [6, 21] что длительное хранение кориума под водой приводит к его частичному выщелачиванию, а также к вторичному фазообразованию в поверхностном слое. В дальнейшем, при извлечении и сушке, поверхность такого материала может превратиться в пыль. Выводы, полученные в результате проекта, позволяют принять экспериментально обоснованные решения при последующем выборе технологии безопасного извлечения кориума из блоков станции.

В Радиевом институте им. Хлопина [21] исследовались твердые модельные образцы кориума, содержащие 40–70 масс.% компонентов бетона, $(U,Zr)_xO_y$ и металлические добавки (Cr, Ni, Fe), которые были получены методом индукционной плавки в холодном тигле при температуре 2200–2500 °С. Исходная структура образцов представляла собой преимущественно аморфную матрицу на основе силиката, в которой диспергированы кристаллические твердые растворы $(U,Zr)_xO_y$, Fe-Cr-Ni шпинель и кристобалит (SiO_2). Модельные образцы кориума подвергались испытаниям на выщелачивание с использованием деионизированной и азотированной воды с различными значениями pH = 4,01, 6,50 и 9,18, при температурах 25, 50, 90 и 120 °С и времени выдержки до 84 дней. Установлено, что растворение фазы на основе силиката начинается при температуре 25 °С в деионизированной и нитридной воде, образуя на поверхности вторичные фазы. И наоборот, такие элементы, как U и Zr, были обнаружены в растворе только через 54 дня выщелачивания при 120 °С.

Первоначальная характеристика включала:

- фазовый анализ (рентгеновский дифрактометр (XRD) D2 PHASER (Bruker, Германия) с $CuK\alpha$ излучением);
- изучение морфологии, микроструктуры, а также элементного анализа (сканирующая электронная микроскопия (СЭМ) в сочетании с энергодисперсионной рентгеновской спектроскопией (ЭДС) с использованием сканирующего электронного микроскопа MIRA3 TESCAN);

- измерения плотности и пористости проводились методом гидростатического взвешивания с использованием аналитических весов OHAUS Explorer E12140;

- определение твердости по микро-Виккерсу (микротвердомер Тиниуса Олсена при нагрузке 9,8 Н, времени нагружения 10 с) на основании 10–15 измерений отпечатков индентирования;

- анализ выщелачивающих растворов (метод оптической эмиссионной спектроскопии с индуктивно-связанной плазмой ICP-EOS (Perkin Elmer), PlasmaQwont мод. PQ 9000) при минимально обнаруживаемой концентрации элементов (U, Zr, Si, Al, Fe, Ca, Ni, Cr) – 10 мкг/дм³.

Характеристики кориума для определения процессов старения

На основании анализа опыта зарубежных ученых выбраны наиболее показательные характеристики кориума, которые, могут характеризовать процессы старения:

- размер и плотность частиц кориума – показатели охрупчивания материала со временем;
- изменения элементного анализа материала по фракциям;
- изменения фазового анализа материала по фракциям;
- твердость крупных частиц кориума – твердость по Виккерсу, которая увеличивается при повышении концентрации UO_2 в составе материала;
- определение активности порошковых материалов.

В зависимости от имеющихся первичных данных по кориуму (результаты материаловедческих исследований, проведенных после экспериментов 10–30 лет назад) произвести сравнение вышеуказанных характеристик.

Описание объекта исследования

Образцы кориума для исследования старения могут быть объединены, например, по следующим признакам:

- 1) по составу исходной шихты и методам охлаждения;
- 2) по составу исходной шихты и типу аварий, моделируемых в экспериментах: внутрикорпусные (использование стальной ловушки расплава, имитирующую днище реактора), внекорпусные (использование бетонной ловушки расплава) и внекорпусные с использованием дополнительных материалов (металлические элементы, жаропрочные материалы, жертвенные материалы в бетонной ловушке и пр.);
- 3) по составу исходной шихты и способу имитации энерговыделения (использование плазмотрона или индуктора в ловушке расплава).

Для разных типов исследования образцы могут представлять собой и габаритные куски кориума, и порошковый материал, и подготовленные шлифы.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Обозначение объекта исследования

Состав модельных расплавов соответствуют кориуму легководных реакторов и в большинстве своем имеют исходный состав шихты: UO_2 , Zr, ZrO_2 , SS, V_4C . В результате моделирования процессов тяжелых аварий на ВВР, в зависимости от целей проекта, исходный состав претерпевает изменения за счет варьирования таких параметров эксперимента как количество переданного расплаву тепла, остаточного энерговыделения в расплаве, способа охлаждения расплава, моделей ловушек, защитных материалов или силового корпуса, имитирующих условия удержания расплава. Получаемая в экспериментах информация, в большинстве своем, многовариантна, но в силу качественной общности решаемых задач, она имеет ряд общих признаков, определяющих возможность систематизации и обобщения результатов отдельных экспериментов и их серий.

В первую очередь, реализованные по данной тематике проекты, были разделены по типам моделирования условий протекания аварии: внутрикорпусные (COTELS-1, INVECOR, «Fukushima Debris») и внекорпусные (COTELS-2, CORMIT, CORMIT-Ph2).

В экспериментах COTELS-1 модель расплава активной зоны ближе к расплаву типа BWR. Базовый состав модельного расплава в проекте INVECOR соответствовал весовому соотношению $UO_2/Zr_{общ.}$ как 78% к 22%, или в полностью окисленном виде $UO_2/ZrO_{2общ.}$ – 72,4% к 27,6%. Степень окисления циркония, определяемая как мольное отношение $ZrO_2/Zr_{общ.}$, составляло 0,32.

Плановые загрузочные составы в экспериментах COTELS-2 соответствовали кориуму запроектной аварии на втором блоке американской АЭС «Three Mile Island» (ТМІ-2). В сериях экспериментов моделировались процессы, характеризующие взаимодействие расплава кориума с бассейном теплоносителя и процессы, происходящие при выходе расплава к бетонным конструкциям реакторного здания.

Расплавы, полученные в проектах CORMIT и CORMIT-Ph2 близки к модельному кориуму, использованному в проекте «Fukushima Debris». Состав расплавляемой композиции в проекте «Fukushima Debris» наиболее соответствует составу кориума ВВР (63% UO_2 , 6% ZrO_2 , 22% циркония и 9% нержавеющей стали).

Без учета стали соотношение в системе состав UO_2-ZrO_2 рабочего состава кориума CORMIT также соответствовало составу большей части экспериментов COTELS. Это связано с тем, что в итоговых интегральных экспериментах выполнялось сравнение условий удержания кориума в бетонной ловушке без защитного материала и с кладкой жаропрочных керамических блоков на основе диоксида циркония (CORMIT-Ph2). Мольное отношение $ZrO_2/Zr_{общ.}$

шихты для получения расплавов составляли 0,13 для CORMIT, 1,0 и 0,13 – в COTELS.

Таким образом, объектом исследования процесса старения кориума может являться имитатор расплава активной зоны ВВР (модельный кориум), полученный в экспериментах по отработке систем пассивной безопасности реакторной установки. По типам модельный кориум можно разделить на три группы: 1) кориум, полученный при моделировании внутрикорпусных аварий на реакторной установке в разный период времени (2005, 2010, 2015 гг.); 2) кориум, полученный в экспериментах по моделированию внекорпусных аварий в разный период времени (1997, 2002, 2014 гг.); 3) кориум, полученный в экспериментах по моделированию внекорпусных аварий с использованием жаропрочных блоков (2014 и 2019 гг.). Во всех экспериментах использовалось водяное охлаждение имитатора расплава.

Основой для выбора того или иного модельного кориума будет являться наличие фактически имеющихся данных на период его получения с целью их сравнения со свойствами за время длительного хранения.

Методика исследования характеристик кориума

На основании изучения опыта зарубежных исследователей [1–5, 10–19] и анализа имеющихся данных по свойствам модельного кориума, была разработана методология исследований для составления прогнозной оценки механизма изменения структурно-фазового состояния кориума в результате длительной выдержки или «старения».

Для оценки текущего состояния модельного кориума необходимо выполнить ряд исследований. Процесс изучения свойств кориума осуществляется по алгоритму, приведенному в таблице 1.

Старение кориума может происходить в естественных условиях сухого хранения, а также при воздействии воды, паров воды, повышенной температуры и прочих условий.

Для определения характеристик модельного кориума, которые играют наиболее важную роль в процессе старения кориума был проведен анализ существующих методов исследования этого процесса [17–18, 20–22]. Результаты аналитического исследования показали, что для оценки структурно-фазовых изменений кориума используются:

- данные по изменению плотности и пористости, механических свойств кориума – для рекомендаций по подбору оборудования для обращения с кориумом;
- данные об активностях, элементном и фазовом составе – для рекомендаций по длительному хранению кориума;
- данные о выщелачивании кориума в процессе старения – для оценки безопасности и прогнозирования свойств.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ СТАРЕНИЯ КОРИУМА

Таблица 1. Алгоритм определения характеристик кориума

№ п/п	Описание процедуры	Оборудование и материалы, метод
1	Подготовка образцов: – взвешивание и маркировка образцов – разделение материала для разных видов исследований (оптическая металлография, фракционирование, элементный, фазовый анализ, определение плотности и пористости и пр.).	– аналитические весы; – индивидуальные упаковки
2	Определение плотности и пористости кориума: – средней и истинной плотности; – открытой и закрытой пористости образцов кориума.	– аналитические весы; – метод гидростатического взвешивания (ГОСТ 26450.1-85, ГОСТ 30629-99)
3	Определение микротвердости	– микротвердомеры; – оптический метод (определение твердости по Виккерсу HV)
4	Определение структуры модельного кориума: – подготовка образцов для оптической металлографии; – проведение оптической металлографии образцов слитка кориума	– шлифовально-полировальный станок; – шлифовальная бумага зернистостью 120 до 2000; – сукно для полирования; – алмазная суспензия с размером частиц 9, 6 и 1 мкм; – металлографический микроскоп; – метод оптической микроскопии.
5	Определение фракционного состава материала: – рассев материала через сита с помощью грохота; – разделение материала по фракциям от 20 мм до 50 мкм; – определение массы каждой фракции; – определение массы материала, оставшегося на ситах	– вибрационный грохот; – ситовой метод (набор сит с размером ячеек от 20 мм до 50 мкм); – метод фракционирования
6	Проведение элементного анализа образцов кориума (по фракциям): – пробоподготовка материала каждой фракции для исследования, измельчение крупной фракции до размера частиц ≈50 мкм), смешивание порошкового материала кориума со связующим материалом, прессование таблетки – элементный анализ	– связующий материал (спектромел $C_2H_{10}O_5$); – гидравлический пресс; – спектрометр; – метод рентгеновской флуоресценции
7	Исследование фазового состава: – пробоподготовка материала каждой фракции для исследования, измельчение крупной фракции до размера частиц ≈50 мкм); – съемка и анализ дифрактограмм	– вибрационный грохот; – рентгеновский дифрактометр; – метод дифрактометрии

Таблица 2. Схема исследований процессов старения кориума

Тип исследования	Тип старения			
	естественное	искусственное*		
	возраст / воздействие			
	воздушная среда	0 лет	0 лет / вода	0 лет / пары воды
Фракционирование	+	+	+	+
Определение плотности частиц	+	+	+	+
Элементный анализ	+	+	+	+
Фазовый анализ	+	+	+	+
Твердость крупных частиц	+/-	+/-	+/-	+/-
Анализ активности	+/-	+/-	+/-	+/-
Анализ выщелачивающих растворов	–	–	+	–
Другие	+	+	+	+

Примечание:

* – Для реализации искусственного старения можно получить модельный кориум при заданных условиях (состав шихты, температура плавления шихты и пр.) в рамках маломасштабных экспериментов на стенде ВЧГ-135 с имитацией выдержки его в воде или в среде водяного пара, результатом которого будет кориум с тем же составом, что и кориум, хранившийся в воздушной среде.

На основании выполненного анализа, предложена схема исследований, приведенная в таблице 2, которая позволит выполнить наиболее полную оценку процессов изменения свойств кориума при длительной выдержке в определенных условиях.

Метрологические аспекты исследований включают требования к оборудованию – используемое оборудование должно быть поверено или иметь сертификат соответствия, подтверждающий определяемые характеристики.

Методика исследования процесса старения кориума в естественных условиях сухого хранения

На первом этапе работ выполняется отбор образцов кориума, схожего по составу исходной шихты, которая применяется для получения имитатора расплава активной зоны водо-водяных реакторов – PWR или BWR. Затем кориум группируется, согласно типу моделируемой аварии: внутрикорпусная (проекты COTELS-1, INVECOR, «Fukushima Debris») или внекорпусная (проекты COTELS-2, CORMIT, CORMIT-Ph2). Предпочтения отдаются образцам модельного кориума с наиболее полным набором характеристик, полученным в период его производства, при этом соблюдается (по возможности) определенная периоди-

чность его формирования, которая может составлять 3, 5 или 10 лет, как было показано ранее.

После отбора (извлечения из хранилища) материала кориума соответствующего состава рекомендуется провести исследования согласно алгоритму, представленному в таблице 1.

Анализ изменения структурно-фазового состояния кориума одного типа проводится на основе сравнения идентичных характеристик, полученных в год его формирования и в год проведения исследований. По совокупности полученных данных, охватывающих длительный период сухого хранения, могут быть построены прогнозные оценки динамики старения материала на 20, 30 и 50 лет.

Кроме того, необходимо учитывать температуру среды при старении кориума в естественных условиях. Градиент температуры, вероятно, также вносит вклад в характеристики кориума, но вопрос влияния температуры хранения на свойства кориума в настоящей статье не рассматривается.

Методика исследования процесса старения кориума при выдержке в водной среде

Изменения свойств кориума при воздействии паров воды и кислорода, высоких температур и различных режимов нагрева могут быть изучены в рамках второй серии исследований – искусственного старения кориума.

Для проведения этой серии экспериментов необходимо получить кориум возрастом «0 лет». Условия получения кориума:

- соотношение материалов шихты для эксперимента должно соответствовать соотношению материалов выбранного прототипа кориума ВВР;
- температура нагрева, время выдержки также должны быть сопоставимы.

Для дальнейших исследований полученный модельный кориум делится на две части (в результате диаметрального разреза плавильного объема) и одна из частей образца изучается в соответствии с алгоритмом, представленным в таблице 1.

Вторая часть модельного кориума испытывается путем выдержки в воде, в процессе которой исследуется скорость выщелачивания элементов для оценки изменения фазового состояния материала. Создание условий для искусственного старения кориума в водной среде заключается в обеспечении более «агрессивных» условий испытаний, например, использование повышенной температуры среды и порошковых. Согласно примеру, приведенному в работе [18], предлагается проводить выдержку образцов модельного кориума в «чистой» водной среде при $T = 50\text{ }^{\circ}\text{C}$ и нейтральном рН.

В соответствии со стандартом ASTM 1220-98 [24] образцы известного объема и геометрической площади поверхности погружаются в эталонные растворы для выщелачивания без перемешивания на определенные периоды времени при определенных температурах (рекомендуются 40, 70 и 90 °С). Отношение площади поверхности к объему (S/V) поддерживается постоянным в пределах 0,5 от 10,0 м⁻¹. Масса и активность кориума определяется до начала эксперимента. Испытания на выщелачивание проводится в соответствии со стандартом [24].

Для поддержания постоянной температуры воды может использоваться климатическая камера, которая обеспечит данный температурный режим на заданный период времени.

Порядок проведения эксперимента по выщелачиванию представлен на рисунке 1. После эксперимента проводятся исследования элементного и фазового составов, фракционный анализ и анализ структуры материала, по результатам которых оценивается изменение характеристик кориума при длительном воздействии воды.

Методика исследования процесса старения кориума при выдержке в среде водяного пара

Эксперимент проводится в ёмкости с кипящей водой. Образцы должны соответствовать требованиям [24] – отношение площади поверхности к объему (S/V) в пределах 0,5 от 10,0 м⁻¹. Схема проведения эксперимента представлена на рисунке 2.

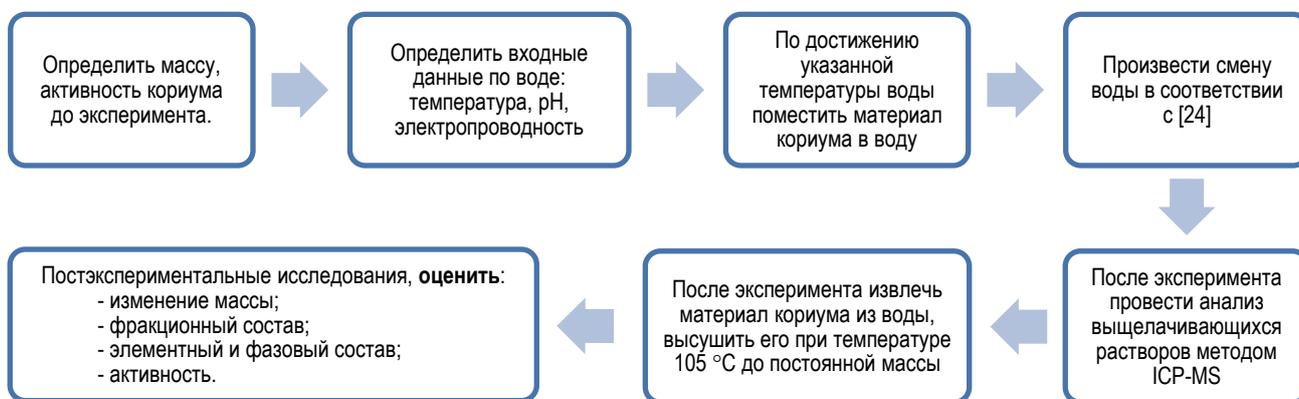


Рисунок 1. Схема проведения эксперимента по выщелачиванию кориума в условиях выдержки в воде

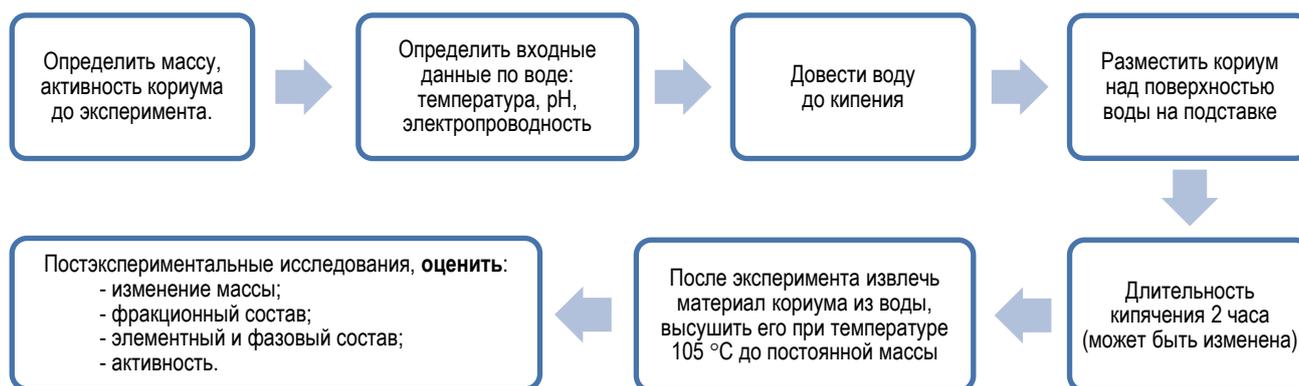


Рисунок 2. Схема проведения эксперимента по выщелачиванию кориума в парах воды

По данным, полученным в постэкспериментальных исследованиях кориума, может быть сформировано представление о динамике изменений свойств кориума в среде водяного пара. В набор данных для характеристики кориума входят сведения о количественном содержании урана в частицах кориума, распределении отдельных частиц кориума по объему образца, плотности и обогащению.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате анализа научно-технической информации по теме исследования и обобщения имеющегося опыта в филиале ИАЭ РГП НЯЦ РК, была разработана методика исследования процессов изменения структурно-фазового состояния кориума.

В работе предложен общий алгоритм исследования свойств кориума, а также матрицы исследований процесса старения в естественных условиях, при длительном сухом хранении и условия создания искусственного старения в водной среде и среде водяного пара.

Определены признаки для выбора объекта исследования и базовые условия для создания модельного кориума.

В методиках предложены способ пробоподготовки, тип аналитического оборудования и метод для каждого вида исследований модельного кориума.

Структурно-фазовые изменения кориума могут быть применены при разработке способов обращения, разработке рекомендаций по длительному хранению, для оценки безопасности и прогнозирования свойств кориума.

Финансирование

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства энергетики Республики Казахстан (BR24792713 «Развитие атомной энергетики в Республике Казахстан»).

ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES

1. J.R. Wolf, J.L. Rempe. TMI-2 Vessel Investigation Project Integration Report. Idaho National Engineering Laboratory, TMI V(93)EG10, October 1993.

2. Asmolv V.G. et al. RASPLAV Final Report. Attachment C Properties Studies: Methodology and Results // OECD RASPLAV Project, Russian Research Centre “Kurchatov Institute”, Moscow, 2000.
3. Barachin M. Thermodynamics of Corium: Phase diagrams, Databases // EURO COURSE 2003, Corium: Severe Accident R&D and Nuclear Power Plant Safety, Aix en Provence, France, January 27–31, 2003.
4. Nakahara, Y. Technical development on burn-up credit for spent LWR fuels JAERITECH 2000-071 / Y. Nakahara, K. Suyama, T. Suzaki. – Ibaraki: Japan Atomic Energy Research Institute, 2000. – 394 p.
5. Рыжов С.Н., Богданова Е.В., Рыжков А.А., Пугачев П.А., Тихомиров Г.В., Терновых М.Ю., Алеева Т.Б. Анализ методов и технологий оценки состава кориума, образовавшегося в результате аварии на АЭС «Fukushima Daiichi» // Глобальная Ядерная Безопасность. – 2022. – № 3. – С. 5–21. [Ryzhov S.N., Bogdanova E.V., Ryzhkov A.A., Pugachev P.A., Tikhomirov G.V., Ternovykh M.Yu., Aleeva T.B. Analiz metodov i tekhnologiy otsenki sostava koriuma, obrazovavshegosya v rezul'tate avarii na AES «Fukushima Daiichi» // Global'naya Yadernaya Bezopasnost'. – 2022. – No. 3. – P. 5–21. (In Russ.)] <https://doi.org/10.26583/gns-2022-03-01>
6. Российские учёные завершили проект по прогнозированию свойств кориума АЭС «Fukushima Daiichi» // Научно-деловой портал «Атомная энергия 2.0». [Rossiyskie uchenye zavershili proekt po prognozirovaniyu svoystv koriuma AES “Fukushima Daiichi” // Nauchno-delovoy portal “Atomnaya energiya 2.0”. (In Russ.)] URL: <https://www.atomic-energy.ru/news/2021/08/02/116094> (дата обращения: 20.07.2024).
7. Нейтронно-физическое моделирование подкритической системы с частицами кориума и водой из международного бенчмарка / А.Д. Смирнов, Е.В. Богданова, П.А. Пугачев [и др.] // Известия высших учебных заведений. Ядерная энергетика. – 2020. – № 2. – С. 135–145. [Neytronno-fizicheskoe modelirovanie podkriticheskoy sistemy s chastitsami koriuma i vodoy iz mezhdunarodnogo benchmarka / A.D. Smirnov, E.V. Bogdanova, P.A. Pugachev [i dr.] // Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Yadernaya energetika. – 2020. – No. 2. – P. 135–145. (In Russ.)] <https://doi.org/10.26583/npe.2020.2.12>
8. Технологические и организационные аспекты обращения с радиоактивными отходами // IAEA-TCS-27, Вена, 2005. [Tekhnologicheskie i organizatsionnye aspekty ob-

- rashcheniya s radioaktivnymi otkhodami// IAEA-TCS-27, Vena, 2005. (In Russ.)]
9. Методические рекомендации «Исследования процессов старения криума». Филиал ИАЭ РГП НЯЦ РК, г. Курчатов. – 2024. – 19 с. [Metodicheskie rekomendatsii «Issledovaniya protsessov stareniya kriuma». Filial IAE RGP NYaTs RK, g. Kurchatov. – 2024. – 19 p. (In Russ.)]
 10. Rogovin, M. Three Mile Island. A report to the commissioners and to the public. Nuclear regulatory commission special inquiry group / Mitchell Rogovin. – University of Michigan Library. – 1980. – 488 p.
 11. Akers, D.W. TMI-2 Examination Results from the OECD/CSNI program. / D.W. Akers, G. Bart, P. Botoomley, A. Brown, D.S. Cox, P. Hoffman, S.M. Jensen, H. Kleykamp, A.J. Manley, L.A. Neimark, M. Trotabas. – Idaho National Engineering Laboratory, Inc. – 1992. – 494 p.
 12. Reactor core materials interaction at very high temperatures / P. Hofmann, S.J. Hagen, G. Schanz, A. Skokan // Nuclear Technology. – 1989. – Vol. 87, No. 1. – P. 146–186.
 13. Akers, D.W. Lower vessel Debris Examination result. – 1989. – 18 p.
 14. TMI-2 core materials examination at CEA // International Atomic Energy Agency (IAEA) URL: https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/_Public/21/040/21040489.pdf?r=1 (дата обращения: 20.07.2024).
 15. Bottomley, D.W. Final report of the metallurgical examination of samples extracted from the damaged TMI-2 reactor core / D.W. Bottomley, M. Coquerelle. – Joint Research Centre. – 1990. – 16 p.
 16. In-Vessel Retention of Molten Corium: Lessons Learned and Outstanding Issues / J.L. Rempe, K.Y. Suh, F.B. Cheung, S.B. Kim // Nuclear Technology. – 2017 – Vol. 161. – No. 3. – P. 210–267.
 17. Benchmark study of the accident at the Fukushima Daiichi NPS: Best-estimate case comparison / M. Pellegrini, K. Dolganov, L. E. Herranz [et al.] // Nuclear Technology. – 2016. – Vol. 196. – No. 2. – P. 198–210. – <https://doi.org/10.13182/NT16-63>
 18. Nishihara, K. Estimation of fuel compositions in Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant JAEA-Data/Code 2012-018 / K. Nishihara, H. Iwamoto, K. Suyama. – Ibaraki: Japan Atomic Energy Agency, 2012. – 190 p.
 19. Development of Molten Core Relocation Analysis Module MCRA in the Severe Accident Analysis Code SAMPSON / H. Ujita, N. Satoh, M. Naitoh, M. Hidaka, N. Shirakawa, M. Yamagishi // Journal of Nuclear Science and Technology. – 2000. – Vol. 37. – No. 3. – P. 225–236 p.
 20. TEPCO Report. Establishing permit application of Fukushima Daiichi Nuclear Power Station; unit 2. – Tokyo: TEPCO, 2003. – 509 p.
 21. NEA OECD, Benchmark Study of the Accident at the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant Summary Report. NEA/CSNI/R(2015)18. – NEA OECD, 2015. – 53 p.
 22. P. V. Slastikhina, A. S. Aloy, V. I. Almjashhev, V. B. Khabensky, N. F. Karpovich, et al. (2022) Study of the Main Properties and Leach Behavior of Simulated MCCI Products. *Enviro Sci Poll Res and Mang: ESPRM-120*.
 23. V.G. Rumynin, K.B. Rozov, A.M. Nikulenkov, L.N. Sindalovskiy, A.S. Aloy, N.F. Karpovich, P.V. Slastikhina, Analytical models for predicting the behavior of the Fukushima fuel debris during laboratory tests and long-term storage // *Journal of Nuclear Materials*. – 2022. – Vol. 568. – P. 153895. ISSN 0022-3115, <https://doi.org/10.1016/j.jnucmat.2022.153895>
 24. ASTM C 1220 - 98 “Standard test method for static leaching of monolithic waste forms for disposal of radioactive waste” 10.07.1998. American society for testing and materials. Reprinted from the Annual Book of ASTM Standarts. – 1998.

КОРИУМНЫҢ ЕСКІРУ ПРОЦЕСТЕРІН ЗЕРТТЕУ ӘДІСТЕМЕСІ

Ю. Ю. Бакланова¹, О. С. Букина^{1,2*}, В. В. Бакланов¹

¹ ҚР ҰЯО РМК «Атом энергиясы институты» филиалы, Курчатов, Қазақстан

² «Семей қаласының Шәкәрім атындағы университеті» КЕ АҚ, Семей, Қазақстан

* Байланыс үшін E-mail: bukina@nnc.kz

Бүгінгі таңда кориумды зерттеу ядролық қауіпсіздікті арттыру аясындағы басты мәселелердің бірі болып табылады және АЭС-тегі белсенді аймақты балқытумен апаттың салдарын жоюдың табысты рәсімін жүргізу міндеттерінің бірі болып табылады. АЭС-тегі аварияның салдарларын жою рәсімі үшін маңызды міндеттердің бірі оны контайменттен алу және онымен одан әрі жұмыс істеу жөнінде шешімдер қабылдау үшін авариялық реактордың (кориумның) белсенді аймағы балқымасының физикалық жай-күйін түсіну болып табылады. Кориумның құрылымы мен қасиеттерін бағалаудың күрделілігі, оны сумен салқындату және ерітіндінің контайментінде немесе тұзағында ұзақ уақыт ұстау нәтижесінде өзгеріске ұшырайды (кориумның «ескіру» процесі), оның жоғары радиоактивтілігіне байланысты.

Кориум өзіне белсенді аймақтың элементтерін (уран отыны, цирконий қабығы), металл конструкциялардың, конструкциялық материалдардың, бетонның және т.б. элементтерін қамтиды. Кориумның пайда болуымен жобадан тыс авариялардың бес жағдайы белгілі: «Three Mile Island-2» АЭС реакторында (АҚШ, 1979 ж.), Чернобыль АЭС-інде (Украина, 1986 ж.) және «Fukushima-1» АЭС-дағы (Жапония, 2011 ж.) авария кезінде кориумның қалыптасуының үш жағдайы байқалды. Бұл оқыс оқиғалардың барлығы ядролық қондырғылардағы қауіпсіздік жүйелерін жетілдірудің өзектілігін де, онымен жұмыс жүргізу үшін кориумның қасиеттерін зерделеу қажеттігін де көрсетті.

Жоғары радиациялық қауіптілікке байланысты кориумның қасиеттерін зерттеу модельдік үлгілерде жүргізіледі. ҚР ҰЯО РМК «Атом энергиясы институты» филиалындағы модельдік кориум зертханалық жағдайларда да, институттың эксперименттік стенділерінде де алынуы мүмкін. Кориумның қасиеттері әртүрлі және шихтаның бастапқы құрамына (белсенді аймақты және конструкциялық материалдарды үлгілейтін компоненттерге) және жобадан тыс аварияны үлгілеу жағдайларына (балқу температурасы, балқыманы салқындату принципі, қалдық энергия бөлудің болуы, балқыманы ұстап тұру тәсілі және т.б.) байланысты болады.

Мақалада кориумды зерттеу саласындағы қазіргі заманғы жетістіктерді талдау нәтижелері, сондай-ақ шетелдік мамандардың тәжірибесі (Жапония, Ресей Федерациясы) [1–4] және ҚР ҰЯО РМК Атом энергиясы институты филиалы мамандарының өздерінің көп жылдық әзірлемелері негізінде қалыптасқан кориумның ескіру процестерін зерттеудің әдістемелік ұсынымдары келтіріледі.

Осы мақалада келтірілген әдістемелік ұсынымдар әртүрлі жағдайларда кориум қасиеттерінің өзгеру процесін тікелей зерттеу үшін, сондай-ақ оны реакторлық қондырғы контайментінде немесе балқыманың реакторлық тұзағында ұстау мерзімінде ескіру процесін болжау үшін пайдаланылуы мүмкін.

Түйін сөздер: кориум, балқыма, жобадан тыс апат, құрылым, қасиеттер, зерттеулер.

METHODOLOGY FOR THE STUDY OF CORIUM AGING PROCESSES

Yu. Yu. Baklanova¹, O. S. Bukina^{1,2*}, V. V. Baklanov¹

¹ Branch “Institute of Atomic Energy” RSE NNC RK, Kurchatov, Kazakhstan

² NP JSC “Shakarim University, Semey”, Semey, Kazakhstan,

* E-mail for contacts: bukina@nnc.kz

To date, the corium research is one of the main issues in the framework of improving nuclear safety and is one of the tasks of conducting a successful procedure to eliminate the consequences of an accident with a core meltdown at the NPP. One of the important tasks for the procedure of eliminating the consequences of an accident at the NPP is to understand the physical state of the core melt of an emergency reactor (corium) in order to make decisions on its removal from the contents and further handling. The difficulty in assessing the structure and properties of the corium, which undergo the changes as a result of cooling with water and prolonged exposure in a melt content or trap (the process of corium “aging”), is in its high radioactivity.

Corium includes elements of the core (uranium fuel, zirconium cladding), elements of metal structures, structural materials, concrete, etc. There are five known cases of non-design accidents with the formation of corium: at the reactor of the Three Mile Island-2 NPP (USA, 1979), at the Chernobyl NPP (Ukraine, 1986) and three cases of corium formation were observed during the accident at the Fukushima -1 NPP (Japan, 2011). All these incidents have shown the relevance of improving safety systems at nuclear installations, as well as the need to study the properties of corium in order to work with it.

Due to the high radiation hazard, the studies of the corium properties are carried out on model samples. The model corium in the “Institute of Atomic Energy” Branch of RSE NNC RK can be obtained both under laboratory conditions and at the experimental benches of the Institute. The corium properties are different and depend on the initial composition of the charge (components modeling the core and structural materials) and the conditions for modeling an out-of-design accident (melting temperature, the principle of the melt cooling, the presence of residual power density, the method of retaining the melt, etc.).

The paper presents the results of the analysis of modern achievements in the field of corium study, as well as methodological recommendations for the study of corium aging processes based on the experience of foreign specialists (Japan, Russian Federation) [1–4] and own long-term developments of the specialists of the branch “Institute of Atomic Energy” RSE NNC RK.

The methodological recommendations given in this paper can be used directly to study the process of changing the corium properties under various conditions, as well as to predict the aging process for a given period of its exposure in the content of a reactor installation or a subreactor melt trap.

Keywords: corium, melt, out-of-design accident, structure, properties, studies.

<https://doi.org/10.52676/1729-7885-2025-1-113-120>

УДК 539.21: 539.12.04: 669.3

ИССЛЕДОВАНИЕ УСТОЙЧИВОСТИ ФАЗОВОГО СОСТАВА И СТРУКТУРНЫХ ПАРАМЕТРОВ НИТРИДНЫХ КЕРАМИК К ТЕРМИЧЕСКИМ ВОЗДЕЙСТВИЯМ

А. Л. Козловский^{1,2*}

¹ *НАО Евразийский национальный университет им. Л.Н. Гумилева, Астана, Казахстан*

² *РГП «Институт ядерной физики» МЭ РК, Алматы, Казахстан*

* E-mail для контактов: kozlovskiy.a@inp.kz

В работе с применением метода in-situ измерений рентгеновских дифрактограмм была изучена стабильность фазового состава, а также структурных параметров Si_3N_4 керамик в широком температурном диапазоне от 25 до 1400 °С, охватывающем диапазон рабочих температур при эксплуатации керамик в экстремальных условиях. Основная цель данного исследования заключается в определении фазовых и структурных изменений в Si_3N_4 керамиках в результате термических воздействий, а также определению роли термического воздействия на структурные особенности керамик, связанные с термическим расширением. В ходе проведенных экспериментов было установлено, что термический нагрев образцов в вакууме не приводит к инициализации процессов окисления, характерных для термообработки Si_3N_4 керамик на воздухе, которые сопровождаются формированием оксидной фазы SiO_2 . При этом оценка весовых вкладов установленных фаз в составе керамик показала отсутствие каких-либо значимых изменений в соотношении фаз во всем измеряемом диапазоне температур отжига. На основе изменений объемов кристаллической решетки обеих фаз в составе Si_3N_4 керамик была определена величина коэффициента теплового объемного расширения в зависимости от температуры воздействия. Установлено, что средняя величина коэффициента $\beta_V(T)$ составляет порядка $8,5\text{--}10 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ для обеих установленных фаз в составе, при этом в случае $\alpha\text{-Si}_3\text{N}_4$ фазы, изменение величины $\beta_V(T)$ имеет явно выраженную зависимость от температуры нагрева.

Ключевые слова: фазовые изменения, Si_3N_4 керамики, структурные параметры, термическое воздействие, поликристаллические структуры, термическое расширение.

ВВЕДЕНИЕ

Изучение структурных особенностей керамических материалов, обладающих большими перспективами применения при работе в экстремальных режимах, в частности, при воздействии высоких температур, агрессивных сред, радиационного воздействия, является одним из важных критериев отбора материалов для практических приложений [1–3]. При этом, в последнее время упор в изучении свойств керамических материалов среди их разнообразия делается на нитридные керамики, которые в отличие от оксидных и карбидных керамик обладают более высокими показателями теплопроводности, что в совокупности с высокими показателями прочностных, механических, коррозионных свойств делает их весьма перспективными материалами для эксплуатации в экстремальных условиях. Особое внимание нитридным керамкам уделяется при рассмотрении их потенциального применения в качестве конструкционных материалов для ядерных и термоядерных приложений, в частности, при возможности использования их в качестве материалов инертных матриц дисперсного ядерного топлива, материалов первой стенки, материалов контейнеров, используемых для длительного хранения отработанного ядерного топлива [4, 5]. Все эти практические приложения использования нитридных керамик подразумевают подвергание их внешним воздействиям, таким как высокие температуры, большие дозы радиации, совокупность кото-

рых может привести к деградации прочностных и теплофизических параметров керамик, а также их дестабилизации за счет накопления структурных искажений в поврежденном слое при длительном внешнем воздействии [6, 7]. Использование керамик на основе нитрида кремния в качестве материалов для ядерных реакторов нового поколения достаточно активно рассматривается в последние годы в виду высоких показателей механической прочности и теплопроводности керамик, обеспечивающих сохранение стабильности к внешним воздействиям в течение длительного времени [8]. При этом одним из ключевых минусов данного типа керамик является их радиационная стойкость, которая снижается за счет формирования в структуре латентных треков и последующей аморфизации поврежденного слоя при высокодозном облучении [9]. В этой связи детализация процессов структурных изменений, способных оказать дополнительное влияние на изменение устойчивости нитридных керамик к внешним воздействиям, в случае эксплуатации при высоких температурах, воздействие которых может привести к ускорению процессов дестабилизации кристаллической структуры за счет теплового расширения является весьма важным для расширением практического применения данных керамик [10–12].

В связи с вышесказанным, основная цель данного исследования заключается в определении влияния температурных факторов, связанных с нагревом об-

разцов на их структурные свойства, изменения которых могут быть обусловлены такими факторами, как накопление и снижение микронапряжений в кристаллической решетке, объемным тепловым расширением, связанным с изменением амплитуды тепловых колебаний, фазовыми трансформациями, обусловленными процессами перекристаллизации в результате термических воздействий. Данные факторы могут играть весьма важную роль в определении кинетики структурных изменений в керамиках при эксплуатации их в экстремальных режимах, связанных с механическими воздействиями, агрессивными средами и или высокими дозами радиации.

В большинстве случаев измерения рентгеновских дифрактограмм проводятся при комнатных температурах, что не позволяет оценить эффекты термического уширения кристаллической структуры в процессе термического воздействия в реальном времени, а результаты полученные на предварительно отожженных образцах отражают только конечное состояние структуры в результате термического воздействия. Использование режима *in-situ* измерений рентгеновских дифрактограмм, связанных с нагревом образцов до определенной температуры и последующего рентгенографирования образцов при заданной температуре, а также сравнительного анализа изменений структурных параметров и фазового состава керамики в широком диапазоне температур позволяет с высокой точностью определить кинетику структурных изменений, возникающую в процессе термического воздействия. При этом на основе полученных изменений структурных параметров, в частности, связанных с изменениями объемов кристаллической решетки, можно определить влияние теплового расширения на изменение структурных особенностей керамики и их роль. Определение зависимостей изменения величин микронапряжений в зависимости от температуры воздействия позволяет в случае подобных измерений оценить эффект термической аннигиляции дефектных включений в составе керамики или динамику их изменений в случае термического воздействия. Совокупность определения данных факторов позволяет установить роль термических воздействий на кристаллическую структуру Si_3N_4 керамики, которые как известно из ряда работ, в случае высокодозного облучения подвергаются процессам аморфизации и формированию в них латентных треков – структурно-измененных областей, возникающих в кристаллической структуре, формирование которых связывают с процессами взаимодействия налетающих ионов, а также связанных с ними процессами дефектообразования [13, 14].

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В качестве исходных образцов для исследований использовались Si_3N_4 керамики, спрессованные из поликристаллического порошка компании Sigma Aldrich (Sigma, USA). Выбор данных образцов для исследований обусловлен большими перспективами

использования данных типов керамики в качестве основы для создания нитридных инертных матриц, обладающих высокими показателями устойчивости к внешним механическим воздействиям, а также теплофизическими характеристиками (20–40 Вт/м·К), значительно превышающими характеристики оксидных керамики (1–5 Вт/м·К). Данные образцы были использованы в виде таблеток, полученных методом прессования под давлением без высокотемпературного отжига, что позволило исключить эффекты термического окисления на воздухе при воздействии высоких температур в случае их спекания.

Определение структурных изменений и фазового состава Si_3N_4 керамики в зависимости от температуры съемки рентгеновских дифрактограмм проводилось в режиме *in-situ* измерений с использованием специальной высокотемпературной приставки, оснащенной рентгеновский дифрактометр Rigaku SmartLab. *In-situ* измерения термических эффектов на структурные параметры исследуемых керамики были проведены в вакууме. Измерения проводились в геометрии Брегг – Brentano в угловом диапазоне 2θ от 10 до 100° , *in-situ* измерения проводились путем нагрева образцов до заданной температуры, их стабилизации при данной температуре, съемке рентгеновской дифрактограммы в заданном угловом диапазоне с последующим дальнейшим нагревом и повторением всех процедур в диапазоне температур от комнатной до 1400°C . Шаг измерений в диапазоне от 25 до 900°C составлял 100°C , в диапазоне от 900 до 1400°C – 50°C . Выбор вариации шагов измерений обусловлен малыми изменениями структурных особенностей в диапазоне от 25 до 900°C и увеличением роли термического воздействия при высоких температурах (выше 900°C), требующего детализации при более меньших шагах измерений. Диапазон измерений ограничивался возможностями температурной камеры, используемой для проведения структурного анализа в режиме *in-situ* измерений рентгеновских дифрактограмм. При этом выбранный диапазон соответствует температурным режимам эксплуатации данного типа керамики при рассмотрении их применимости в качестве материалов для ядерных реакторов.

Определение весовых вкладов определенных фаз в структуре керамики при изменении условий термического воздействия образцов было осуществлено с использованием метода, основанного на определении весовых долей дифракционных рефлексов для каждой определенной фазы в общую дифрактограмму с последующим вычислением их процентного соотношения с использованием формулы (1), в которой I_{phase} , $I_{\text{admixture}}$ – весовые доли дифракционных рефлексов основной фазы и примесной (второй фазы), R – структурный фактор. Уточнение весовых вкладов проводилось с учетом корундовых чисел из базы данных PDF2 (2016).

$$V_{admixture} = \frac{RI_{phase}}{I_{admixture} + RI_{phase}} \quad (1)$$

Вычисление величины коэффициента теплового объемного расширения ($\beta_V(T)$) проводилось с использованием формулы (2), в которой $V_{initial}$ – величина объема кристаллической решетки в исходном состоянии, ΔV – разность объемов кристаллической решетки в исходном состоянии и при термическом нагреве, ΔT – разница температур при измерениях.

$$\beta_V(T) = \frac{1}{V_{initial}} \frac{\Delta V}{\Delta T} \quad (2)$$

На основе полученных значений $\beta_V(T)$ была определена кинетика термического воздействия на фазовый состав керамик, а также определено поведение структурных параметров при различном термическом воздействии. Для определения величин объемов кристаллической решетки было осуществлено уточнение параметров для всех образцов при различных температурах нагрева, а также проведена оценка деформационных искажений, связанных с накоплением микронапряжений, вычисление которых было проведено с применением метода Вильямсона – Холла [15, 16].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Наиболее точным методом определения структурных характеристик и их изменений в результате внешних воздействий, в том числе и температурных является метод рентгеновской дифракции, использо-

вание которого позволяет определить не только вариацию структурных параметров, изменения фазового состава, но и определить кинетику деформационных искажений, связанных с накоплением в структуре дефектов и напряжений. При этом использование метода рентгеновской дифракции позволяет косвенно оценить объемные изменения происходящие в кристаллической структуре исследуемых образцов, а также выявить влияние различных факторов на данные изменения. На рисунке 1 приведена рентгеновская дифрактограмма исследуемых Si_3N_4 керамик, отражающая результаты оценки фазового состава исследуемых образцов, а также структурные особенности, связанные со степенью кристалличности и наличием деформационных искажений в кристаллической структуре. Общий вид представленной дифрактограммы исследуемых образцов свидетельствует о поликристаллической природе исследуемых керамик, при этом оценка фазового состава, проведенная путем сопоставления положения и интенсивностей дифракционных рефлексов экспериментально полученной дифрактограммы с результатами карточных значений, взятых из базы данных свидетельствует о наличии двух фаз в составе исследуемых керамик, имеющих разный весовой вклад в составе образцов.

Фазовый состав исследуемых Si_3N_4 керамик представлен смесью двух фаз α - Si_3N_4 (PDF-01-071-6479) и β - Si_3N_4 (PDF-01-073-3035), весовое соотношение которых составляет 92,1% и 7,9% соответственно (см. данные, приведенные на круговой диаграмме на вставке к рисунку 1).

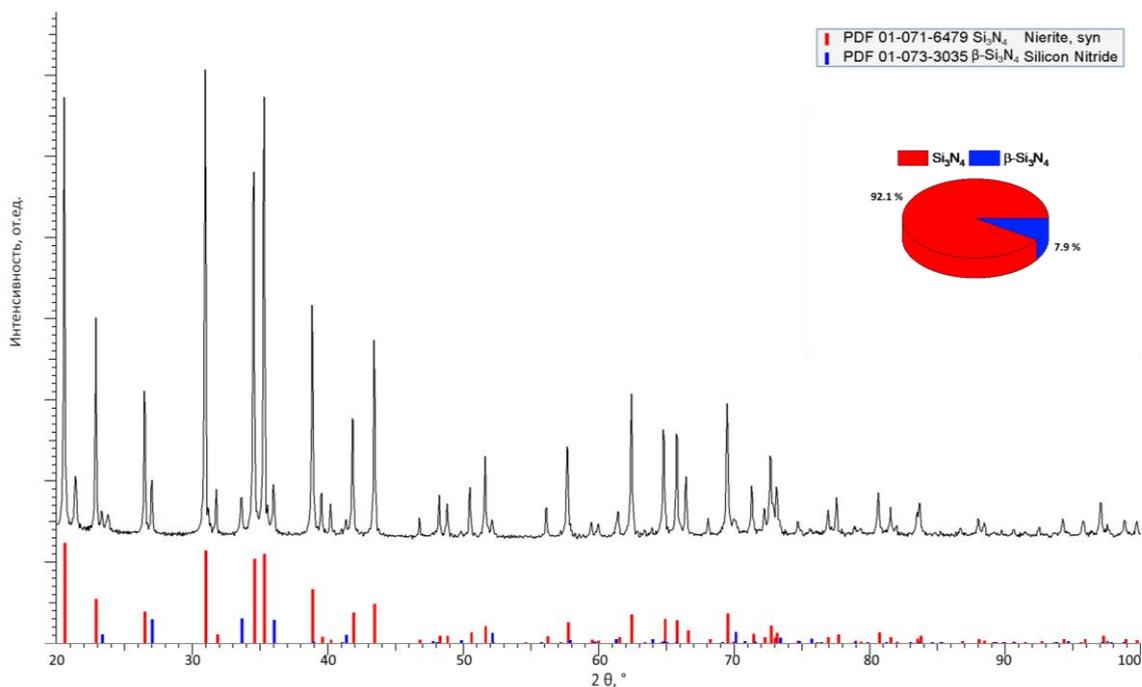


Рисунок 1. Результаты рентгенофазового анализа исследуемых Si_3N_4 керамик в исходном состоянии (штриховая диаграмма приведенная на рисунке отражает положение основных дифракционных рефлексов для каждой определенной фазы из базы данных PDF-2)

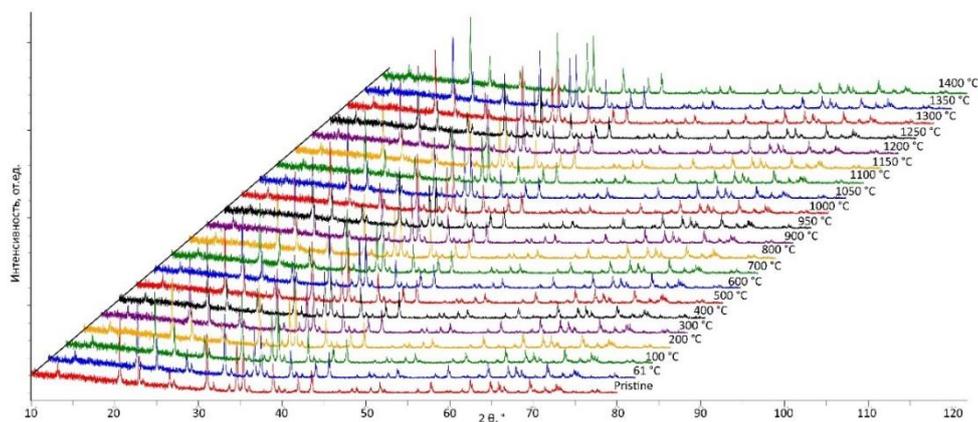


Рисунок 2. Результаты *in-situ* измерений рентгеновских дифрактограмм Si_3N_4 керамик в диапазоне от 25 до 1400 °C

Подобный фазовый состав свидетельствует о том, что в структуре керамик наличие малого содержания примесной фазы $\beta\text{-Si}_3\text{N}_4$ может привести к структурным изменениям, связанным с процессами фазовых трансформаций при термическом воздействии, так как наличие двух фаз обуславливает возможность фазовых трансформаций при изменении температурных режимов нагрева. При этом следует отметить, что степень кристалличности исследуемых образцов в исходном состоянии составляет порядка 95%, что свидетельствует о достаточно высоких показателях структурного упорядочения и малой доли деформационных искажений в структуре.

На рисунке 2 приведены результаты *in-situ* измерений рентгеновских дифрактограмм Si_3N_4 керамик в случае изменения температуры нагрева в камере измерений при последовательной съемке. Данные отражают кинетику изменений фазового состава, а также структурных особенностей, вызванных термическим воздействием в случае изменения температуры. Общий вид представленных рентгеновских дифрактограмм исследуемых Si_3N_4 керамик в зависимости от температуры воздействия свидетельствует о стабильности кристаллической структуры керамик к процессам термического окисления или разложения, приводящих к частичной аморфизации при длительном термическом воздействии или высоких температур. Результаты измерений рентгеновских дифрактограмм, описывающие изменения формы и интенсивности дифракционных рефлексов обеих установленных фаз в составе керамик во всем измеряемом температурном диапазоне свидетельствуют о высокой стабильности кристаллической структуры керамик к процессам термически – стимулированной аморфизации. При этом сохранение величины степени кристалличности в пределах допустимой погрешности (порядка 1–2%) свидетельствуют об устойчивости степени структурного упорядочения к процессу термического нагрева в широком диапазоне температур отжига.

На рисунке 3 приведены результаты оценки изменений величин весовых вкладов установленных

$\alpha\text{-Si}_3\text{N}_4$ и $\beta\text{-Si}_3\text{N}_4$ фаз в составе образцов при изменении температуры нагрева, которые были получены путем анализа полученных дифрактограмм с применением формулы (1). Как видно из представленных данных, существенных изменений соотношения фаз в составе керамик при изменении температуры воздействия не наблюдается, из чего можно сделать вывод о том, что термическое воздействие без других внешних воздействий, таких как механическая нагрузка или радиационные повреждения не приводят к существенным изменениям фазового состава. Оценка величин стандартного отклонения для обеих установленных фаз в составе керамик в зависимости от температуры составила не более 0,58%, что свидетельствует о весьма малых изменениях фазового состава керамик при термическом нагреве и, как следствие, высокой устойчивости сохранения соотношения фаз во всем измеряемом температурном режиме, что также позволяет сделать вывод о том, что при термическом воздействии без дополнительных внешних воздействий, фактор полиморфных фазовых превращений не проявляется и не оказывает влияния на изменения структурных особенностей.

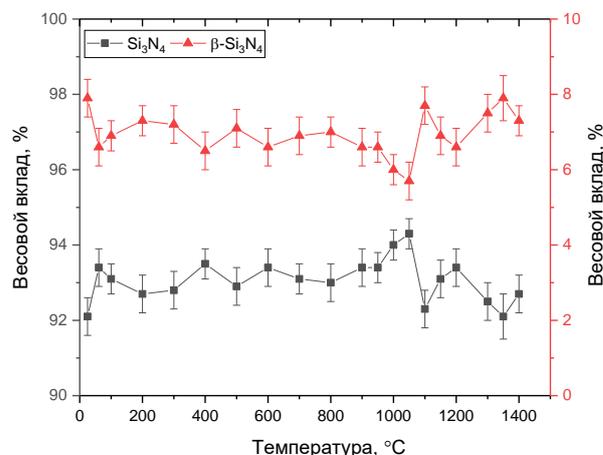


Рисунок 3. Результаты рентgenoфазового анализа, отражающие изменение весовых вкладов установленных фаз в составе исследуемых керамик в режиме *in-situ* измерений

На основе полученных результатов весовых вкладов α - Si_3N_4 и β - Si_3N_4 фаз был рассчитан фактор стабильности соотношения весовых вкладов β - $\text{Si}_3\text{N}_4/\alpha$ - Si_3N_4 , величина которого характеризует сохранение весовых вкладов в зависимости от температуры нагрева. Средняя величина β - $\text{Si}_3\text{N}_4/\alpha$ - Si_3N_4 составила $0,074 \pm 0,006$, сохранение которой свидетельствует об отсутствии прямого влияния температурного воздействия на инициализацию процессов полиморфных фазовых трансформаций в кристаллической структуре исследуемых образцов, что в свою очередь позволяет сделать вывод о том, что возможные изменения соотношения фаз, вызванные внешними воздействиями, к примеру, в случае облучения тяжелыми ионами имеют сложную природу, связанную в деформационными искажениями [17, 18], возникающими в результате взаимодействия тяжелых ионов с кристаллической структурой, а также при трансформации переданной кинетической энергии в тепловую.

На рисунке 4а приведены результаты оценки деформационных искажений кристаллической решетки установленных фаз в составе Si_3N_4 керамик, определенные с применением метода оценки Вильямсон – Холла, основанного на построении зависимостей $\beta \cos \theta (\sin \theta)$ [15, 16]. Результаты оценки величины деформационных искажений – микронапряжений в зависимости от температуры отжига, как видно из представленных данных не имеют явно выраженной зависимости от температуры, что свидетельствует об отсутствии или малом влиянии термического воздействия на деформационные искажения кристаллической структуры обеих фаз во всем измеряемом температурном диапазоне. Отсутствие какой-либо зависимости изменений деформационных искажений, связанных с микронапряжениями, свидетельствует о том, что наблюдаемые изменения параметров кристаллической решетки в данном случае обусловлены эффектами термического расширения за счет изменений амплитуды тепловых колебаний атомов в узлах кристаллической решетки. Наблюдаемые изменения величин микронапряжений для исследуемых образцов в зависимости от температуры воздействия, не имеющие явно выраженных трендов, связанных с ростом или снижением микронапряжений, свидетельствуют об отсутствии существенного влияния процессов термического нагрева на релаксацию структурных дефектов в керамиках, что также свидетельствует о высокой стабильности структурных особенностей исследуемых керамик в широком диапазоне температур нагрева.

На рисунке 4б приведены результаты оценки изменений объема кристаллической решетки обеих фаз в составе Si_3N_4 керамик в зависимости от температуры термического нагрева образцов, изменения которой отражают структурные изменения кристаллической структуры, связанные с термическими воздействиями. Общий вид представленных зависимостей из-

менения объема кристаллической решетки исследуемых фаз в составе керамик в зависимости от температуры отжига свидетельствует о положительной динамике роста объема, свидетельствующей о термическом уширении кристаллической структуры в результате нагрева. При этом отсутствие прямой корреляции изменений объема кристаллической решетки с результатами деформационных искажений (микронапряжений), свидетельствует о том, что данное изменение связано не деформационными напряжениями, вызванными миграцией структурных дефектов или вакансий, а термическим воздействием, обуславливающим изменение амплитуды тепловых колебаний атомов в узлах кристаллической решетки, приводящей к изменению ее объема.

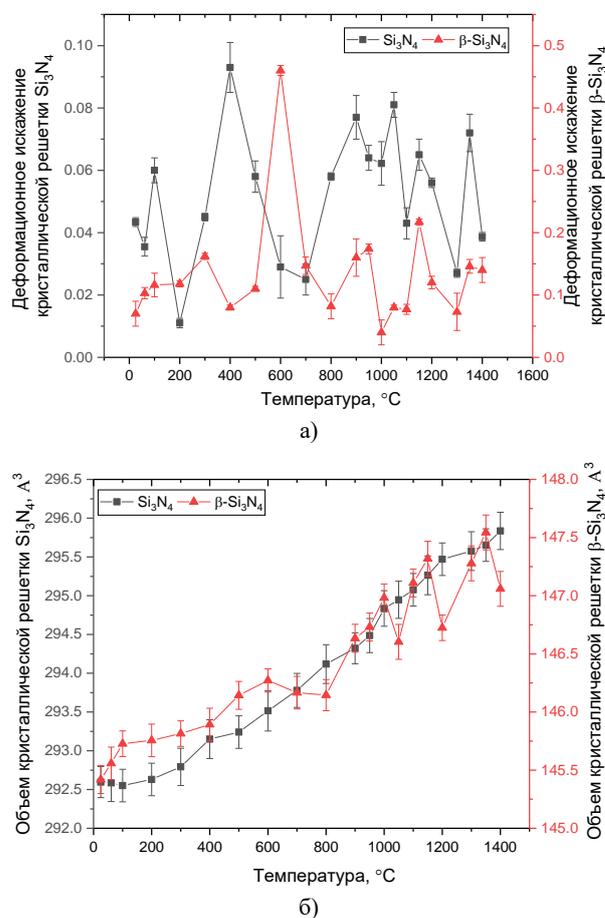


Рисунок 4. а) Результаты оценки изменения величин деформационных искажений (микронапряжений) кристаллической решетки обеих фаз в зависимости от температуры отжига (расчеты выполнены путем анализа полученных данных с применением метода Вильямсона – Холла); б) Результаты изменения объемов кристаллической решетки для обеих фаз в составе Si_3N_4 керамик

Оценка величин ΔV для двух α - Si_3N_4 и β - Si_3N_4 фаз путем сравнения изменений объемов кристаллической решетки в исходном состоянии (до термического воздействия) и в случае термического нагрева при

температуре 1400 °C показала, что в случае α -Si₃N₄ величина ΔV составляет 3,2 Å³, в то время как для фазы β -Si₃N₄ величина ΔV составляет порядка 1,6 Å³. Из чего следует, что фаза β -Si₃N₄ более устойчива к объемному расширению при термическом воздействии, за счет более плотной упаковки (объем кристаллической решетки для β -Si₃N₄ составляет 145,4 Å³, в то время как для α -Si₃N₄ величина объема кристаллической решетки составляет порядка 292,6 Å³). Такое различие (более чем двукратное) в изменениях ΔV также следует учитывать при оценке термических воздействий в случае структурных изменений в керамиках при термическом воздействии.

На рисунке 5 приведены результаты оценки изменения величины коэффициента теплового объемного расширения ($\beta_V(T)$), отражающего влияние температурного воздействия на изменение структурных параметров кристаллической решетки обеих фаз в образцах в зависимости от температуры воздействия. Расчеты были выполнены с использованием формулы (2). Определение динамики изменения величины коэффициента $\beta_V(T)$ в зависимости от температуры нагрева для каждой из двух установленных фаз позволяет оценить кинетику изменений, связанных с тепловым расширением, обусловленным изменением амплитуды тепловых колебаний атомов в узлах кристаллической решетки.

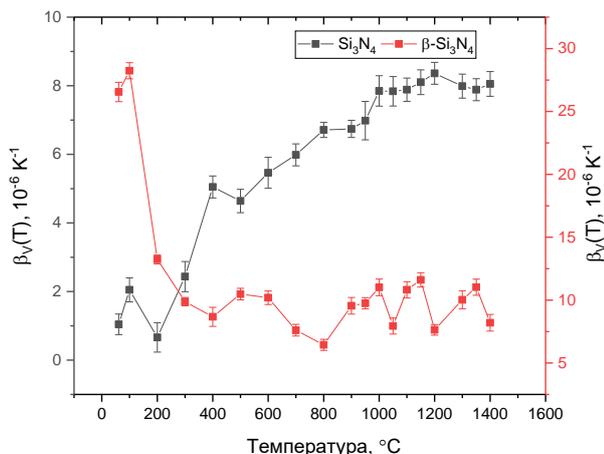


Рисунок 5. Результаты оценки изменений величины коэффициента теплового объемного расширения кристаллической решетки для обеих фаз в составе Si₃N₄ керамик

Согласно оценке величин $\beta_V(T)$, представленных для двух наблюдаемых фаз в составе керамик, можно сделать вывод о том, что для фазы α -Si₃N₄ наблюдается рост коэффициента $\beta_V(T)$ в диапазоне температур от 25 до 1000 °C с $1,2 \cdot 10^{-6}$ до $7,5\text{--}8,2 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ с последующей стабилизацией величины $\beta_V(T)$ (в пределах погрешности измерений) в диапазоне температур 1000–1400 °C. Подобные изменения в данном случае могут быть объяснены структурными особенностями данной фазы, обладающей меньшей стабильностью к термическим воздействиям, в отличие

от β -Si₃N₄ фазы, для которой изменение величины $\beta_V(T)$ практически во всем измеряемом диапазоне составляет $9\text{--}10 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$. Как видно из представленных данных, рост величины коэффициента $\beta_V(T)$ для α -Si₃N₄ фазы, являющейся достаточно стабильной в случае низких температур, и подверженной термическому расширению при высоких температурах (разница в величинах коэффициента $\beta_V(T)$ составляет более чем 3 раза) может привести к более выраженным структурным изменениям в образцах при термическом воздействии, совмещенном с механическими и деформационными факторами в процессе эксплуатации. При этом разница в величинах $\beta_V(T)$ для двух фаз в случае высоких температур может способствовать эффекту термического расширения за счет тепловых эффектов, совокупность которых совместно с деформационными искажениями, вызванными внешними воздействиями, к примеру, воздействием тяжелых ионов, при которых наблюдается частичная аморфизация поврежденного слоя [17, 18], будет способствовать ускоренному разупорядочению кристаллической структуры за счет совокупности факторов. Также следует отметить, что различия в величинах $\beta_V(T)$ в случае изменений фазового состава керамик или их соотношения может привести к более выраженной дестабилизации кристаллической структуры при внешних воздействиях, что также необходимо учитывать при прогнозировании потенциала использования данного типа керамик, а также определения режимов эксплуатации, обладающих оптимальными условиями, при которых стабильность совокупности структурных, прочностных и теплофизических параметров сохраняется достаточно длительное время.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе представлены результаты исследований влияния температурных факторов на изменение структурных особенностей и фазового состава в Si₃N₄ керамиках. В качестве метода оценки был применен метод in-situ измерений рентгеновских дифрактограмм образцов при их термическом нагреве, использование которого позволило определить кинетику структурных изменений, связанных с термическим объемным расширением. Полученные результаты стабильности соотношения α -Si₃N₄ и β -Si₃N₄ фаз в составе керамик при вариации температуры термического воздействия свидетельствует о том, что в данном температурном диапазоне процессы фазовых трансформаций не могут быть инициированы без каких-либо других внешних воздействий. В ходе проведенных исследований было определено отсутствие какого-либо значимого влияния термического воздействия на процессы, связанные с изменениями величин микроскажений в структуре керамик, что в свою очередь свидетельствует о высокой термической стабильности дефектных включений к температурному воздействию, которое даже в случае высоких температур не способно оказать существенного влияния на релаксацию дефектных включений.

Практическая значимость полученных результатов заключается в определении сохранения стабильности фазового состава Si_3N_4 керамик в зависимости от температурного воздействия в режиме in-situ измерений. Полученные результаты свидетельствуют о том, что при рассмотрении эффектов термического воздействия на свойства Si_3N_4 керамик без дополнительных внешних воздействий эффекты, связанные с полиморфизмом (изменением фазового состава за счет процессов структурной перестройки) можно исключить, однако, следует учитывать эффекты, связанные с различием коэффициентов теплового объемного расширения, которые различны для α - Si_3N_4 и β - Si_3N_4 фаз, а также имеют явно выраженную температурную зависимость для α - Si_3N_4 фазы при сохранении стабильности величины $\beta_V(T)$ в широком температурном диапазоне для β - Si_3N_4 фазы. Определенные величины $\beta_V(T)$ для обеих фаз в зависимости от температуры воздействия в дальнейшем могут быть использованы при рассмотрении структурных изменений, вызванных внешними воздействиями (к примеру, облучением тяжелыми ионами) совмещенными с термическим нагревом (к примеру, в случае моделирования процессов радиационных повреждений максимально приближенных к реальным условиям эксплуатации керамик).

Исследование финансируется Комитетом науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан (No. AP22785867).

ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES

- Lee W. E. et al. Opportunities for advanced ceramics and composites in the nuclear sector // Journal of the American Ceramic Society. – 2013. – Vol. 96, No. 7. – P. 2005–2030.
- Sadiq I., Asim Ali S., Ahmad T. Advanced Hybrid Ceramics for Nuclear and Hydrogen Energy Applications // Chemistry Select. – 2023. – Vol. 8, No. 27. – P. e202300837.
- Sauder C. Ceramic matrix composites: nuclear applications // Ceramic matrix composites: materials, modeling and technology. – 2014. – P. 609–646.
- Lee W. E. et al. Opportunities for advanced ceramics and composites in the nuclear sector // Journal of the American Ceramic Society. – 2013. – Vol. 96, No. 7. – P. 2005–2030.
- Evarts J. S. et al. Ceramic–Metal (Cermet) Composites: A Review of Key Properties and Synthesis Methods Focused on Nuclear Waste Immobilization // Industrial & Engineering Chemistry Research. – 2024. – Vol. 63, No. 14. – P. 6003–6023.
- Youinou G. J., Abou-Jaoudé A. Preliminary Conceptual Design of Nuclear Thermal Rocket Reactor Cores Using Ceramic Fuels with Beryllium or Composite Neutron Moderators // Nuclear Science and Engineering. – 2024. – Vol. 198, No. 8. – P. 1534–1565.
- Kočí J. et al. Effect of long-term high-temperature exposure in a controlled atmosphere on mullite-corundum ceramics for advanced applications in nuclear power technology // Ceramics International. – 2024. – Vol. 50, No. 13. – P. 24273–24280.
- Ojovan M. I., Yudinsev S. V. Glass, ceramic, and glass-crystalline matrices for HLW immobilisation // Open Ceramics. – 2023. – Vol. 14. – P. 100355.
- Zhou X. et al. Fabrication of beryllium oxide based fully ceramic microencapsulated nuclear fuels with dispersed TRISO particles by pressureless sintering method // Journal of Nuclear Materials. – 2024. – Vol. 588. – P. 154798.
- Bocanegra-Bernal M. H., Matovic B. Mechanical properties of silicon nitride-based ceramics and its use in structural applications at high temperatures // Materials Science and Engineering: A. – 2010. – Vol. 527, No. 6. – P. 1314–1338.
- Komeya K. Materials development and wear applications of Si_3N_4 ceramics // Improved Ceramics through New Measurements, Processing, and Standards. – 2006. – Vol. 133. – P. 3–16.
- Carrapichano J. M., Gomes J. R., Silva R. F. Tribological behaviour of Si_3N_4 -BN ceramic materials for dry sliding applications // Wear. – 2002. – Vol. 253, No. 9–10. – P. 1070–1076.
- Van Vuuren A. J. et al. Microstructural effects of Al doping on Si_3N_4 irradiated with swift heavy ions // Acta Phys. Pol. A. – 2019. – Vol. 136. – P. 241–244.
- Canut B. et al. Ion-induced tracks in amorphous Si_3N_4 films // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms. – 2008. – Vol. 266, No. 12–13. – P. 2819–2823.
- Zak A. K. et al. X-ray analysis of ZnO nanoparticles by Williamson–Hall and size–strain plot methods // Solid State Sciences. – 2011. – Vol. 13, No. 1. – P. 251–256.
- Nath D., Singh F., Das R. X-ray diffraction analysis by Williamson–Hall, Halder–Wagner and size–strain plot methods of CdSe nanoparticles—a comparative study // Materials Chemistry and Physics. – 2020. – Vol. 239. – P. 122021.
- Zhumazhanova A. et al. Raman study of polycrystalline Si_3N_4 irradiated with swift heavy ions // Crystals. – 2021. – Vol. 11, No. 11. – P. 1313.
- van Vuuren A. J. et al. Analysis of the microstructural evolution of silicon nitride irradiated with swift Xe ions // Ceramics International. – 2020. – Vol. 46, No. 6. – P. 7155–7160.

НИТРИДТІ КЕРАМИКАНЫҢ ФАЗАЛЫҚ ҚҰРАМЫ МЕН ҚҰРЫЛЫМДЫҚ ПАРАМЕТРЛЕРІНІҢ
ТЕРМИЯЛЫҚ ӘСЕРГЕ ТҰРАҚТЫЛЫҒЫН ЗЕРТТЕУ

А. Л. Козловский^{1,2*}

¹ Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті КЕАҚ, Астана, Қазақстан

² ҚР Энергетика министрлігі «Ядролық физика институты» РМК, Алматы, Қазақстан

* Байланыс үшін e-mail: kozlovskiy.a@inp.kz

Рентгендік дифрактограммаларды өлшеудің in-situ әдісін қолдана отырып, фазалық құрамның тұрақтылығы, сондай-ақ Si₃N₄ керамикасының құрылымдық параметрлері 25-тен 1400 °C-қа дейінгі кең температуралық диапазонда зерттелді, бұл керамиканы экстремалды жағдайларда пайдалану кезінде жұмыс температурасының диапазонын қамтиды. Бұл зерттеудің негізгі мақсаты термиялық әсерлер нәтижесінде Si₃N₄ керамикасындағы фазалық және құрылымдық өзгерістерді анықтау, сондай-ақ термиялық кеңеюге байланысты керамиканың құрылымдық ерекшеліктеріне термиялық әсердің рөлін анықтау болып табылады. Жүргізілген тәжірибелер барысында вакуумдағы үлгілерді термиялық қыздыру SiO₂ оксид фазасының түзілуімен бірге жүретін ауадағы керамиканың Si₃N₄ термиялық өңдеуіне тән тотығу процестерінің инициализациясына әкелмейтіні анықталды. Сонымен қатар, керамика құрамындағы белгіленген фазалардың салмақтық үлестерін бағалау күйдіру температурасының барлық өлшенген диапазонында фазалық арақатынаста маңызды өзгерістердің жоқтығын көрсетті. Si₃N₄ керамикасының құрамындағы екі фазаның кристалдық торы көлемінің өзгеруіне сүйене отырып, әсер ету температурасына байланысты жылу көлемінің кеңею коэффициентінің шамасы анықталды. $\beta_V(T)$ коэффициентінің орташа шамасы құрамда белгіленген екі фаза үшін де шамамен $8,5-10 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ болатындығы анықталды, ал α -Si₃N₄ фаза жағдайында $\beta_V(T)$ шамасының өзгеруі қыздыру температурасына айқын тәуелділікке ие.

Түйін сөздер: фазалық өзгерістер, Si₃N₄ керамика, құрылымдық параметрлер, термиялық әсер, поликристалды құрылымдар, термиялық кеңейту.

STUDY OF THE STABILITY OF PHASE COMPOSITION AND STRUCTURAL PARAMETERS OF
NITRIDE CERAMICS TO THERMAL EFFECTS

A. L. Kozlovskiy^{1,2*}

¹ NAS L.N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, Kazakhstan

² RSE "Institute of Nuclear Physics" ME RK, Almaty, Kazakhstan

* E-mail for contacts: kozlovskiy.a@inp.kz

In the work, using the method of in-situ measurements of X-ray diffraction patterns, the stability of the phase composition, as well as the structural parameters of Si₃N₄ ceramics, was studied in a wide temperature range from 25 to 1400 °C, covering the range of operating temperatures during the use of ceramics in extreme conditions. The main aim of this study is to determine the phase and structural changes in Si₃N₄ ceramics as a result of thermal effects, as well as to determine the role of thermal effects on the structural features of ceramics associated with thermal expansion. During the experiments it was established that thermal heating of samples in a vacuum does not lead to the initialization of oxidation processes characteristic of heat treatment of Si₃N₄ ceramics in air, which are accompanied by the formation of the oxide phase SiO₂. At the same time, the assessment of the weight contributions of the established phases in the composition of ceramics revealed the absence of any significant alterations in the phase ratio in the entire measured range of annealing temperatures. Based on changes in the volumes of the crystal lattice of both phases in the composition of Si₃N₄ ceramics, the value of the thermal volume expansion coefficient was determined depending on the exposure temperature. It was found that the average value of the $\beta_V(T)$ coefficient is about $8.5-10 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ for both established phases in the composition, while in the case of the α -Si₃N₄ phase, the change in the $\beta_V(T)$ value has a clearly expressed dependence on the heating temperature.

Keywords: phase changes, Si₃N₄ ceramics, structural parameters, thermal effects, polycrystalline structures, thermal expansion.

<https://doi.org/10.52676/1729-7885-2025-1-121-131>
УДК 539.213.26

ИССЛЕДОВАНИЯ ВЛИЯНИЯ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ФАКТОРОВ НА СКОРОСТЬ НАКОПЛЕНИЯ СТРУКТУРНЫХ ПОВРЕЖДЕНИЙ В КОМПОЗИТНЫХ КЕРАМИКАХ

А. Л. Козловский^{1,2,3*}, С. Б. Азамбаев¹, М. Е. Кенжина^{2,3}, А. У. Толенова³

¹ НАО «Евразийский национальный университет им. Л.Н. Гумилева», Астана, Казахстан

² РГП «Институт ядерной физики» МЭ РК, Алматы, Казахстан

³ Satbayev University, Алматы, Казахстан

* E-mail для контактов: kozlovskiy.a@inp.kz

В работе рассмотрено влияние температуры нагрева при облучении тяжелыми ионами композитных керамик на процессы структурного разупрочнения и разупорядочения, вызванные накоплением радиационных повреждений. Вариация температуры облучения составляла от 300 до 1000 К, что позволило имитировать процессы радиационных повреждений, наиболее приближенных к реальным условиям эксплуатации. В ходе проведенных исследований была определена прямая зависимость между изменениями степени разупрочнения твердости и прочности на изгиб от величины объемно-деформационного распухания кристаллической структуры, а также вклад термических эффектов в деградацию структурных и прочностных свойств керамик. Согласно полученным данным, установлено, что увеличение концентрации аморфных включений в поврежденном слое, наличие которых имеют прямую зависимость как от флюенса облучения, так и температуры, приводит к более выраженной деградации прочностных характеристик, свидетельствующих о дестабилизации устойчивости керамик к процессам разупрочнения при высокодозном облучении. При этом степень разупрочнения имеет прямую зависимость от температуры облучения, что в случае рассмотрения применимости данных керамик в качестве материалов инертных матриц требует учета при прогнозировании сроков их эксплуатации. Определено, что увеличение температуры облучения приводит к более выраженной дестабилизации прочностных свойств, в особенности, ухудшении твердости и прочности на изгиб при флюенсах 10^{13} – 10^{14} ион/см², деградация которых превышает допустимые значения снижения в 5% от начальных значений.

Ключевые слова: композитные керамики; радиационные повреждения; температурные факторы; дефекты; разупрочнение; деградация.

ВВЕДЕНИЕ

Как известно, эксплуатация композитных керамик в качестве материалов инертных матриц дисперсного ядерного топлива подразумевает под собой не только воздействие осколков деления и нейтронного облучения, но и температурные эффекты, выраженные в высокотемпературных режимах эксплуатации при которых повышается глубина выгорания ядерного топлива, а также повышается КПД ядерных реакторов [1–3]. В данном случае поведение материалов инертных матриц к процессам накопления радиационных повреждений совмещенных с термическим нагревом является весьма важным, так как в случае высоких температур на кинетику накопления структурных повреждений, а также сами механизмы дестабилизации будут зависеть от внешних факторов, обусловленных изменениями амплитуды тепловых колебаний, ускорением процессов диффузии точечных и вакансионных дефектов, а также эффектами термического расширения кристаллической решетки [4, 5]. В случае термического воздействия, изменение амплитуды тепловых колебаний атомов в узлах кристаллической решетки может привести к увеличению подвижности структурных дефектов, а также ускорению их миграции в поврежденном слое. Диффузия вакансионных и точечных дефектов при высоких температурах может привести не только к

более выраженной агломерации дефектов в поврежденном слое, но и уширению глубины поврежденного слоя за счет миграции дефектов вглубь образца, тем самым увеличивая толщину поврежденного слоя [6, 7]. Совокупность этих факторов может привести к ускорению процессов дестабилизации поврежденного слоя, выражающегося в его охрупчивании и разупрочнении, при гораздо меньших флюенсах, чем при облучении при комнатной температуре. В виду этого для уточнения потенциала применимости композитных керамик в качестве материалов инертных матриц, работающих в экстремальных условиях, включающих высокие температуры и большие дозы облучения, необходимы эксперименты, связанные с высокотемпературным облучением образцов, результаты которых позволят определить различия в кинетике деградации приповерхностного слоя, а также определить влияние температурных эффектов на механизмы разупрочнения и дестабилизации прочностных характеристик [8–12].

Основная цель представленного в данной работе исследования заключается в определении роли температуры облучения на изменение структурных и прочностных параметров композитных Si_3N_4 – Al_2O_3 керамик, подверженных облучению тяжелыми ионами Xe^{23+} при вариации флюенса облучения. Основной упор в исследовании направлен на выявление

влияния температурных факторов на скорость деградации приповерхностного слоя, выражающуюся в изменении структурных параметров, связанных с объемным расширением кристаллической решетки, а также деградации прочностных свойств (твердости и прочности на изгиб). Новизна данного исследования включает в себя проведение тестовых испытаний, направленных на выявление влияния температуры облучения на степень деструкции приповерхностного слоя керамик, а также его разупрочнения, возникающего в результате диффузии дефектов в поврежденном слое. При этом подбор температурных режимов воздействия при облучении подбирался с учетом возможности имитации воздействия осколков деления ядерного топлива на материал керамик максимально приближенных к реальным условиям эксплуатации.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В качестве объектов для исследования определения влияния температурных эффектов на скорость деструкции приповерхностного слоя керамик были выбраны композитные керамики на основе соединений $\text{Si}_3\text{N}_4 - \text{Al}_2\text{O}_3$ с соотношением компонент 0,4 М Si_3N_4 и 0,6 М Al_2O_3 , для которых характерно наличие четырех фаз в составе: доминирующих фаз $\text{Al}_2(\text{SiO}_4)\text{O} - \text{Al}_2\text{O}_3$ с весовыми вкладами 43,4 вес.% и 40,8 вес.% соответственно, а также включений в виде фаз Si_3N_4 и SiO_2 с весовыми вкладами 9,0 и 6,8 вес.% соответственно [13]. Данная комбинация фаз позволила получить высокопрочные керамики, для которых значение твердости составляет порядка 1452 МПа, а устойчивость к растрескиванию при трехточечном изгибе 935 МПа. Выбор данного соотношения компонент обусловлен наиболее высокими показателями устойчивости к радиационно-стимулированным процессам деструкции приповерхностного слоя, вызванных облучением тяжелыми ионами Xe^{23+} при температуре 300 К [14].

С целью определения влияния наличия межфазных границ в керамиках на сдерживание механизмов разупорядочения, а также выявление влияния температурных эффектов, приводящих к ускорению процессов деформационного искажения кристаллической структуры, и как следствие, изменений прочностных и теплофизических параметров была проведена серия экспериментальных работ, включающих в себя облучения выбранных образцов керамик тяжелыми ионами Xe^{23+} с энергией 230 МэВ при трех различных температурах 300, 700 и 1000 К. Варьирование флюенсов облучения осуществлялось в диапазоне от 10^{11} до 10^{14} ион/см², который охватывает область формирования одиночных изолированных дефектных областей при малых флюенсах, а также их перекрытия в случае больших флюенсов, при которых усиливается эффект структурных искажений за счет увеличения плотности дефектных областей и их наложения друг на друга в процессе облучения.

Определение влияния вариация условий облучения на структурные изменения приповерхностного

слоя в керамиках было проведено с применением метода рентгеноструктурного анализа. Съемка рентгеновских дифрактограмм была осуществлена с применением порошкового дифрактометра D8 Advance ESO (Bruker, Германия). Дифрактограммы были получены с применением метода Брегг – Брентано, съемка дифрактограмм осуществлялась в диапазоне $2\theta = 15-90^\circ$, время набора спектра составляло 1 сек, шаг съемки $0,03^\circ$. При выборе типа ионов и их энергии длина пробега ионов в материале составляет порядка 15–20 мкм. При этом подбор режимов рентгенографирования был осуществлен с учетом длины пробега ионов, так чтобы измерения осуществлялись только с поврежденной области, отражающей структурные изменения.

Величина объемного распухания была определена путем сравнения изменений величин объемов кристаллической решетки в исходном состоянии и после облучения, что позволило определить изменения вызванные накоплением структурных деформаций и повреждений при облучении, а также определить роль температуры воздействия на процессы деформационного распухания.

Определение изменений твердости приповерхностного слоя, значения которой отражают степень деструкции, вызванной накоплением структурных дефектов при изменении условий облучения, было осуществлено с применением метода индентирования, реализованного с помощью микротвердомера LM 700 (LECO, Святой Иосиф, США). Индентирование осуществлялось при постоянной нагрузке на индентер в 100 Н, время воздействия индентера на образец составляло порядка 30 сек. Прочность на изгиб измерялась с применением метода трехточечного изгиба реализованного с помощью испытательной машины LFM-L 10 kN (Walter + Bai AG, Лёнинген, Швейцария). Измерения осуществлялись путем воздействия на образец с идентификацией момента, при котором фиксируется появление трещин в образце.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Термические эффекты, связанные с изменением температуры тепловых колебаний атомов в кристаллической решетке, увеличивающей ее подвижность, в результате чего происходит тепловое расширение кристаллической структуры, могут оказать негативное влияние на изменение кинетики накопления структурных повреждений в керамиках при увеличении плотности дефектных областей, возникающих при увеличении флюенса облучения [15–17]. Термическое расширение в свою очередь может также способствовать ускорению процессов миграции точечных и вакансионных дефектов, которые под действием температуры способны диффундировать на большую глубину, что может привести к уширению толщины поврежденного слоя, изменение которой негативно сказывается на прочностных характеристиках, а также сроках эксплуатации керамик. В данном случае увеличение подвижности точечных и вакансион-

ных дефектов в результате воздействия высоких температур может привести к более выраженным структурным изменениям, связанным как с накоплением деформационных искажений кристаллической решетки, так и накоплением метастабильных включений, связанных с образованием сильноразупорядоченных аморфноподобных областей, накопление которых может привести к дестабилизации приповерхностного слоя. Для оценки структурных изменений в результате вариации условий облучения тяжелыми ионами, а также выявления механизмов структурного разупорядочения поврежденного слоя в зависимости от флюенса облучения (в пересчете на величину атомных смещений) был применен метод рентгеноструктурного анализа. На рисунках 1–3 приведены результаты рентгеноструктурного анализа исследуемых образцов керамик в зависимости от вариации флюенса облучения в случае трех различных температур облучения, вариация которых позволила смоделировать различные режимы, приближенные к реальным условиям эксплуатации.

Общий вид представленных рентгеновских дифрактограмм в зависимости от флюенса облучения отражают эффекты структурной деградации, выражающиеся в накоплении структурных повреждений в виде деформационных искажений кристаллической структуры (смещений положения дифракционных максимумов в область малых углов, а также искажениями формы рефлексов), и накоплением аморфноподобных метастабильных включений в поврежденном слое (выражающиеся в изменении интенсивности дифракционных рефлексов в сравнении с исходным образцом). Следует отметить, что изменений фа-

зового состава в исследуемых образцах керамик при увеличении флюенса облучения не установлено, что свидетельствует о стабильности фазового состава к процессам фазовых полиморфных превращений или процессам рекристаллизации, при которых может происходить формирование новых фаз в составе образцов. При этом наиболее выраженные изменения дифрактограмм исследуемых образцов в зависимости от флюенса облучения наблюдаются при флюенсах выше 10^{12} ион/см², для которых характерно увеличение плотности структурно-деформированных включений, а также возникновения эффекта их перекрытия при увеличении флюенса облучения. В данном случае наблюдаемые изменения свидетельствуют о накопительном эффекте структурных искажений, вызванных облучением, а также связанных с ними увеличением плотности деформационных напряжений растягивающего типа, о наличии которых свидетельствует смещение дифракционных рефлексов.

Для образцов $\text{Si}_3\text{N}_4 - \text{Al}_2\text{O}_3$ керамик, облученных при температурах 700 и 1000 К появление новых дифракционных рефлексов также не наблюдалось, однако изменение интенсивностей снижения дифракционных рефлексов более выражены, чем в случае облучения образцов при температуре 300 К. Подобный характер изменений свидетельствует о том, что характер и скорость накопления структурных искажений в случае увеличения температуры облучения становится более выраженным, чем в случае облучения при комнатной температуре (300 К), что в свою очередь также свидетельствует о снижении сопротивляемости керамик к процессам разупорочения и устойчивости к накоплению радиационных дефектов.

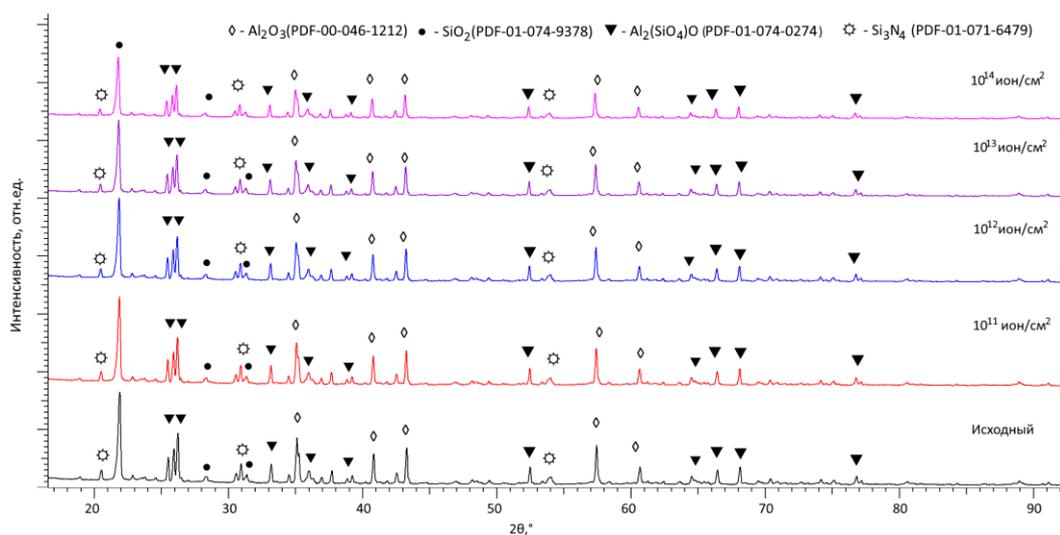


Рисунок 1. Результаты исследований рентгеноструктурного анализа $\text{Si}_3\text{N}_4 - \text{Al}_2\text{O}_3$ керамик, подверженных облучению тяжелыми ионами Xe^{23+} при температуре 300 К

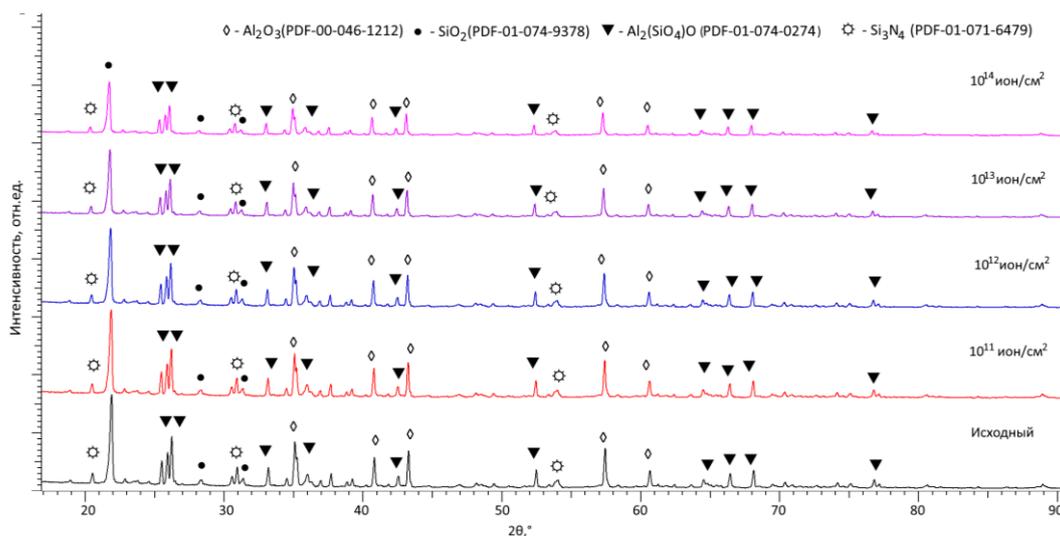


Рисунок 2. Результаты исследований рентгеноструктурного анализа $\text{Si}_3\text{N}_4 - \text{Al}_2\text{O}_3$ керамик, подверженных облучению тяжелыми ионами Xe^{23+} при температуре 700 К

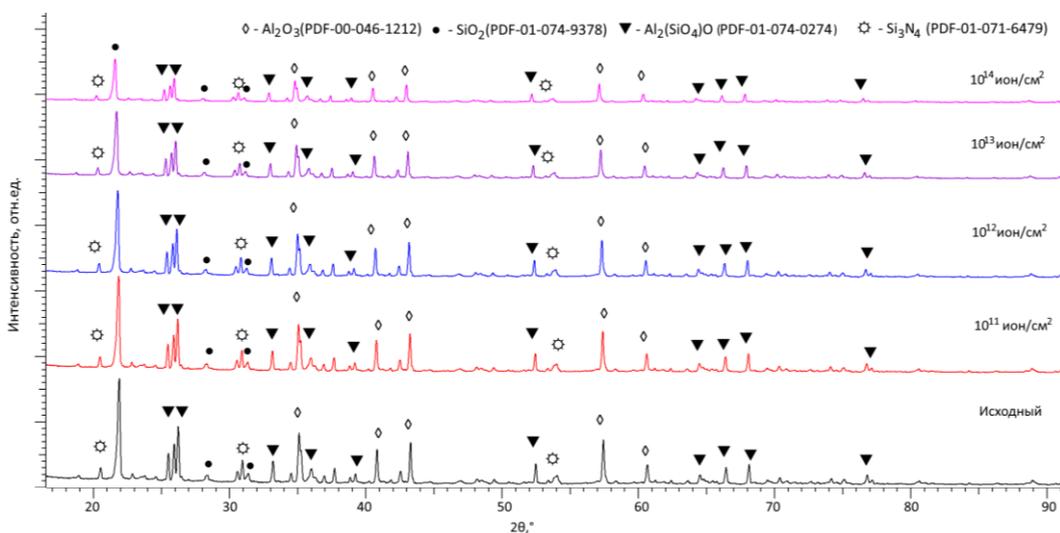


Рисунок 3. Результаты исследований рентгеноструктурного анализа $\text{Si}_3\text{N}_4 - \text{Al}_2\text{O}_3$ керамик, подверженных облучению тяжелыми ионами Xe^{23+} при температуре 1000 К

На рисунке 4 приведены результаты сравнительного анализа изменений формы и положений наиболее интенсивных рефлексов, наглядно характеризующих деформационные искажения и накопление метастабильных аморфноподобных включений в составе керамик. Данные представлены в виде изменений основных рефлексов, с вычитанием фона, чтобы отразить влияние температурных факторов на изменение структурных параметров, выражающихся в изменении интенсивности дифракционных рефлексов, а также их смещении, свидетельствующим о деформационных искажениях.

Как видно из представленных данных сравнительного анализа, в случае образцов $\text{Si}_3\text{N}_4 - \text{Al}_2\text{O}_3$ керамик, облученных при температуре 300 К, в случае флюенсов облучения $10^{11} - 10^{12}$ ион/см² изменение интенсивности, формы и положения максимумов имеет минимальные отклонения от значений для ис-

ходного образца, что свидетельствует о достаточно высокой устойчивости керамик к процессам структурного разупорядочения, вызванных формированием структурно-деформированных включений в результате взаимодействия тяжелых ионов с кристаллической структурой. В случае увеличения флюенса облучения, наблюдаются более выраженные изменения дифракционных рефлексов, которые свидетельствуют о проявлении в структуре накопительного эффекта, связанного с увеличением плотности перекрытия структурно-деформированных включений, накопительный эффект которых, как видно из представленных данных, приводит к снижению интенсивности дифракционных рефлексов, изменение которых свидетельствует о процессах накопления структурно-разупорядоченных включений и частичной аморфизации (сильного структурного разупорядочения). В свою очередь увеличение температуры облучения

с 300 до 700 и 1000 К приводит к увеличению интенсивности наблюдаемых изменений дифракционных рефлексов, согласно которым можно сделать вывод об увеличении подвижности точечных и вакансионных дефектов, что в свою очередь приводит к ускорению дестабилизации поврежденного слоя. Следует отметить, что в случае $\text{Si}_3\text{N}_4 - \text{Al}_2\text{O}_3$ керамик, облученных при температурах 700 и 1000 К, снижение интенсивности дифракционных рефлексов наблюдается при флюенсе 10^{12} ион/см², а сам характер и тренд снижения имеет явно выраженную зависимость от температуры облучения. Подобные изменения свидетельствуют о том, что при одних и тех же плотностях структурно-деформированных включений, возникающих в результате взаимодействия налетающих ионов с кристаллической структурой, но оказывающих различный вклад в изменения структурных параметров, выражающийся в более выраженных изменениях интенсивности дифракционных рефлексов, а также их смещении в область малых углов, свидетельствующее об увеличении деформационных растягивающих напряжений в структуре, ключевую роль в изменениях оказывают тепловые эффекты. Тепловые эффекты, в данном случае заключаются в изменении амплитуды колебаний атомов в узлах кристаллической решетки, что в совокупности с ионизационными эффектами приводит к усилению их подвижности, а также более интенсивному выбиванию из узлов, с последующей диффузией. При этом термически стимулированная диффузия точечных и вакансионных дефектов приводит к более выраженной дестабилизации кристаллической структуры, выражающейся в увеличении деформационных искажений, а также аморфизации (сильному разупорядочению) поврежденного слоя при высоких флюенсах облучения (10^{13} – 10^{14} ион/см²). При увеличении температуры, возникающий эффект термического расширения, оказывает негативное влияние на устойчивость кристаллической структуры к процессам деформационных искажений, результатом которых является более выраженные эффекты структурной деградациии, выражающиеся как в объемно-деформационном распухании за счет накопления растягивающих микронапряжений и искажений кристаллической структуры, так и увеличением концентрации структурно-разупорядоченных метастабильных включений в поврежденном слое. При этом сравнивая изменения интенсивностей и положения дифракционных рефлексов при максимальном флюенсе облучения можно сделать вывод о том, что при температуре облучения 1000 К наблюдается максимальная степень деградациии поврежденного слоя, выражающаяся как в увеличении деформационного искажения за счет сильно выраженных растягивающих напряжений, так и большой плотности метастабильных структурно-разупорядоченных областей.

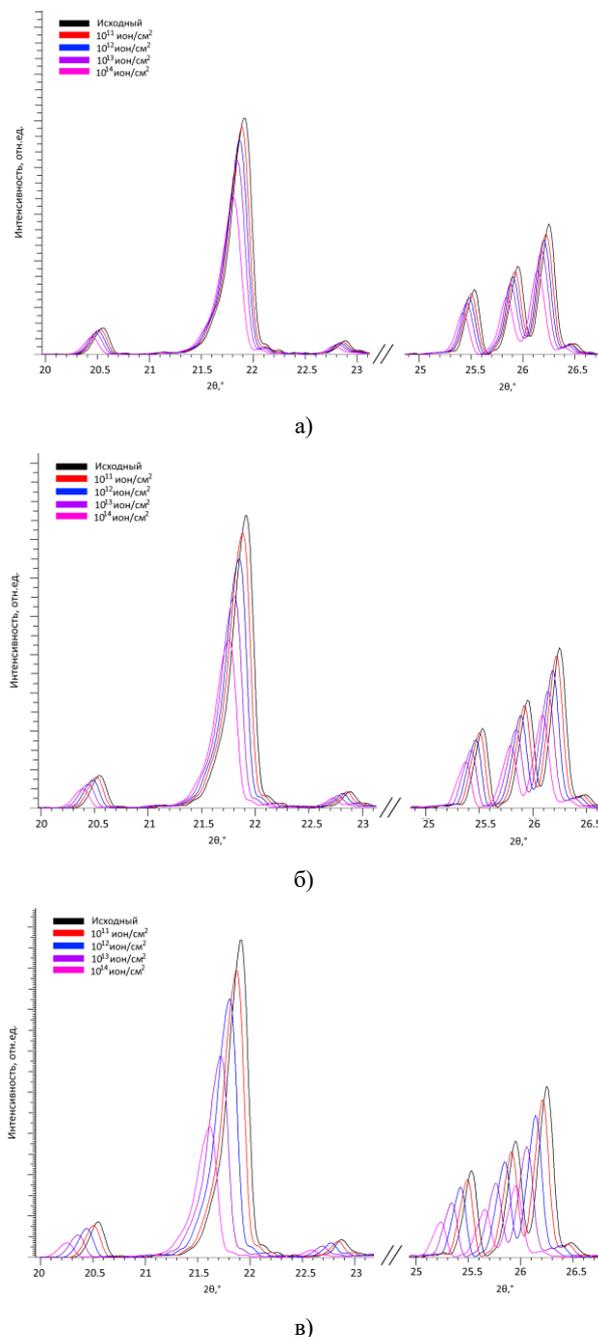


Рисунок 4. Результаты сравнительного анализа изменений интенсивности и положения дифракционных рефлексов в зависимости от флюенса облучения при вариации температуры облучения: 300 К (а); 700 К (б); 1000 К (в)

На основе оценки структурных параметров была определена величина объемного распухания кристаллической структуры поврежденного слоя, связанная с изменением объемов кристаллической решетки при деформационных искажениях, накопление которых происходит в поврежденном слое при увеличении флюенса облучения. Результаты оценки представлены на рисунке 5 в виде зависимостей изменений величины ΔV от величины атомных смеще-

ний, рассчитанной на основе изменений величины флюенса облучения тяжелыми ионами и величин вакансионных дефектов, образующихся в результате взаимодействия налетающих ионов с кристаллической структурой. Как видно из представленных данных, изменение величины объемного распухания в случае образцов, облученных при температуре 300 К, наиболее проявлено только при максимальном флюенсе облучения (10^{14} ион/см²), из чего можно сделать вывод о том, что в случае облучения при данном температурном режиме, доминирующими процессами в механизмах структурной деградации являются процессы, связанные с накоплением деформационных напряжений, которые сдерживаются наличием межфазных границ, что приводит к малым изменениям объемного распухания. При этом изолированность структурно-деформированных включений при малых флюенсах, а также при их наложении друг на друга при флюенсах 10^{12} – 10^{13} ион/см², не оказывает существенного влияния на деформацию кристаллической структуры, за счет сдерживания миграционных процессов наличием межфазных границ. При высоких флюенсах облучения (10^{14} ион/см²) ключевую роль в изменении структурных параметров начинает играть накопление метастабильных включений, концентрация которых выражается в изменении интенсивности дифракционных максимумов и их уширении.

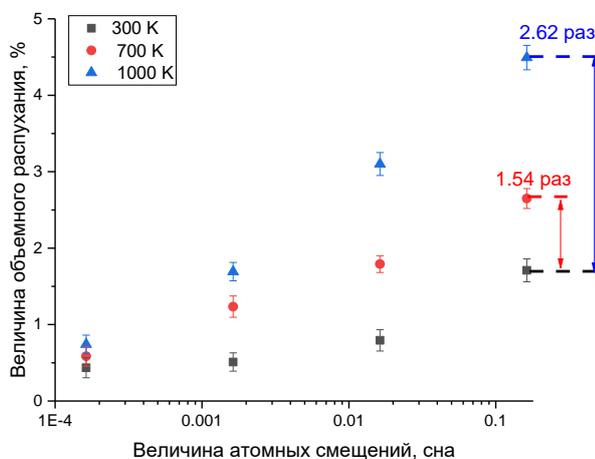


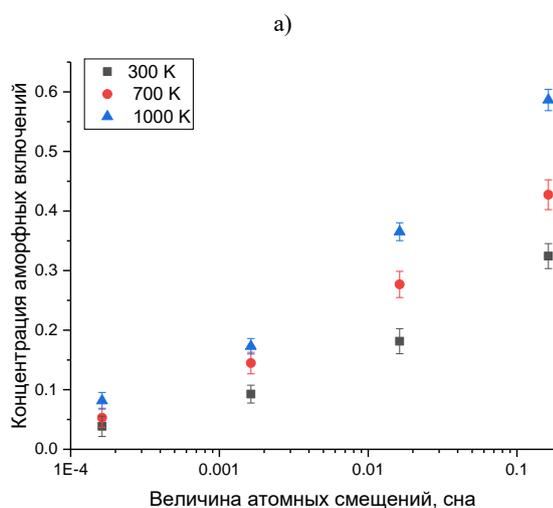
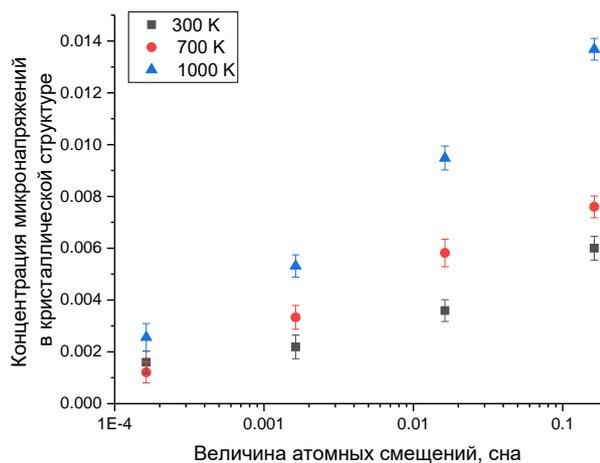
Рисунок 5. Результаты оценки изменений величины объемного распухания кристаллической структуры поврежденного слоя в $\text{Si}_3\text{N}_4 - \text{Al}_2\text{O}_3$ керамиках в зависимости от величины атомных смещений, рассчитанной на основе результатов моделирования ионизационных потерь

В данном случае увеличение эффекта дестабилизации повреждений, вызванных облучением, обусловлено эффектом перекрытия дефектных областей, возникающих при увеличении плотности повреждений в случае высоких флюенсов. Наложение дефектных областей, образующихся вдоль траектории движения ионов в материале приводит к агломерации дефектов, что создает в структуре поврежденного слоя

метастабильные области, плотность которых возрастает. В случае высокотемпературного облучения при температурах 700 и 1000 К, вклад изменений концентрации метастабильных включений в составе поврежденного слоя более выражен, чем в случае образцов, подвергнутых облучению при температуре 300 К, что в свою очередь подтверждает наблюдаемые изменения увеличения величины объемного распухания для данных режимов облучения, приведенных на рисунке 5. Роль термических эффектов в степень объемного распухания можно оценить путем сравнения величин объемного распухания при максимальных флюенсах, анализ которых показал, что в случае увеличения температуры облучения с 300 К до 700 К, величина объемного распухания при флюенсе 10^{14} ион/см² составит более чем 2,4%, что в 1,54 раза выше величины объемного распухания образцов, облученных при температуре 300 К. При увеличении температуры с 300 К до 1000 К разница в величинах объемного распухания составляет порядка 2,6 раз, что свидетельствует о достаточно явно выраженной деструкции поврежденного слоя керамики, связанного с процессами аморфизации и дестабилизации кристаллической структуры.

На рисунках 6а и 6б приведены результаты оценки величин микронапряжений и концентрации метастабильных аморфноподобных включений в поврежденном слое, определенных на основе изменений формы и интенсивности дифракционных рефлексов в зависимости от флюенса и температуры облучения. Оценка микронапряжений осуществлялась путем измерений разницы величин межплоскостных расстояний для наблюдаемых рентгеновских дифракционных рефлексов при их смещении в область малых углов, отражающих искажения кристаллической структуры в результате накопления деформационных напряжений растягивающего типа. Определение величины концентрации аморфных включений проводилось путем сравнительного анализа изменений величины интенсивностей дифракционных рефлексов, с учетом изменений величины FWHM дифракционных максимумов, увеличение которой в совокупности с изменениями интенсивности дифракционных рефлексов свидетельствует о формировании в структуре метастабильных включений, имеющих сильно разупорядоченную структуру, близкую к аморфной. Данные представлены в виде изменений величины от 0 до 1, где 0 – в структуре нет аморфноподобных включений, 1 – структура полностью аморфизовалась в результате внешних воздействий.

Результаты изменений величин деформационных факторов свидетельствуют о том, что процессы накопления микронапряжений и аморфных (сильно разупорядоченных) включений в поврежденном слое при увеличении флюенса облучения имеет равновероятный характер, который в особенности проявляется для образцов облученных при температурах 700 К и 1000 К.



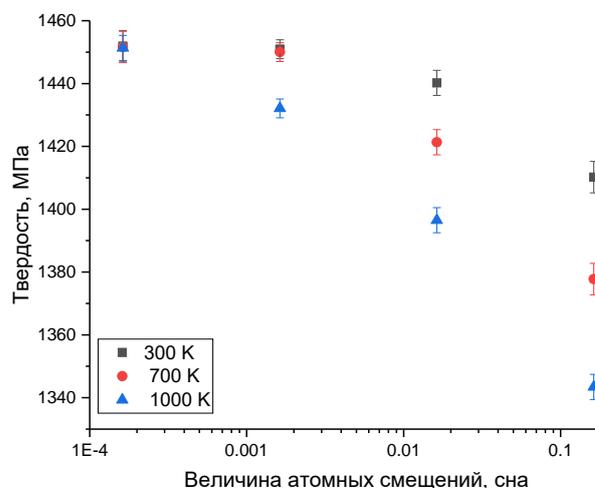
б)

Рисунок 6. Результаты оценки деформационных факторов в поврежденном слое при изменении условий облучения: изменение концентрации микронапряжений в кристаллической структуре при накоплении атомных смещений (а); изменение концентрации аморфных включений в поврежденном слое, связанное с разупорядочением кристаллической структуры при увеличении флюенса облучения (б)

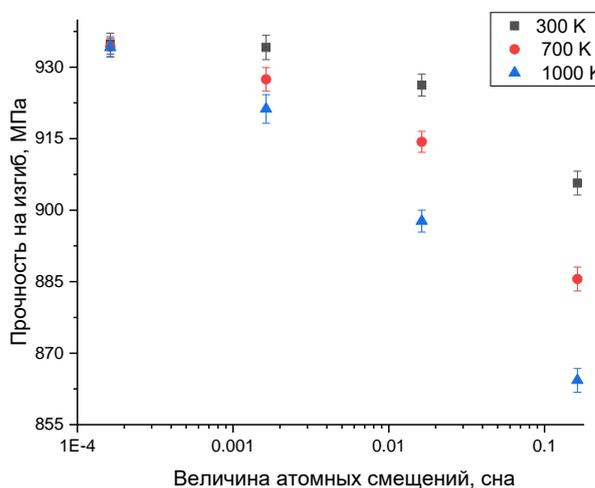
При этом следует отметить, что накопление деформационных микронапряжений растягивающего типа в зависимости от флюенса облучения имеет более выраженный тренд на увеличение для образцов, облученных при температуре 1000 К, из чего следует, что термические эффекты, связанные с изменением амплитуды тепловых колебаний, а также увеличением подвижности точечных и вакансионных дефектов имеют прямую корреляцию с температурой, при которой происходит их формирование, а также вся последующая эволюция, приводящая к более выраженной дестабилизации поврежденного слоя, а также его разупорядочению, связанному с накоплением метастабильных аморфноподобных включений. Термические эффекты, в данном случае способствуют ускорению процессов деструкции поврежденного слоя,

что приводит к более выраженным изменениям, порядок величин которых достигается при более меньших флюенсах, чем в случае облучения керамик при температурах 300 К и 700 К. Данный эффект наглядно проявлен в изменениях величин деформационных микронапряжений при сравнении трендов изменений в зависимости от величин атомных смещений (флюенса облучения).

На рисунке 7 приведены результаты изменений прочностных характеристик в виде зависимостей изменения твердости (см. данные на рисунке 4а) и прочности на изгиб (см. данные на рисунке 4б) исследуемых $\text{Si}_3\text{N}_4 - \text{Al}_2\text{O}_3$ керамик в зависимости от величины атомных смещений.



а)



б)

Рисунок 7. Результаты оценки деградации прочностных характеристик исследуемых $\text{Si}_3\text{N}_4 - \text{Al}_2\text{O}_3$ керамик: изменение твердости (а) и прочности на изгиб (б) в зависимости от величины атомных смещений

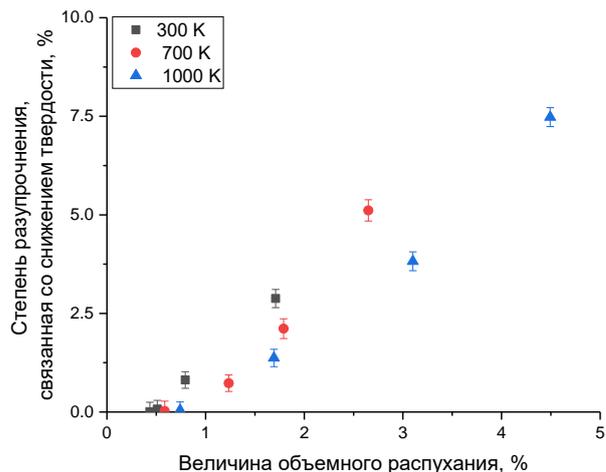
Данные представлены в виде сравнительных графиков, выражающих деградацию прочностных свойств как в случае увеличения флюенса облучения, так и при изменении температуры облучения, увели-

чение которой, как было установлено из изменений структурных характеристик, приводит к более выраженным изменениям, связанным с термическими эффектами.

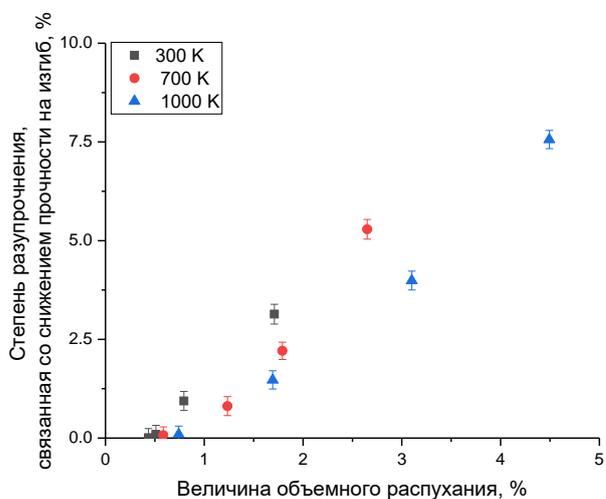
Как видно из представленных данных, ухудшение прочностных характеристик (твердости и прочности на изгиб) имеют аналогичные тренды изменений в зависимости от флюенса и температуры облучения, из чего следует, что данные снижения обусловлены одними и теми же механизмами, связанными с деградацией кристаллической структуры, и как следствие, накоплением структурно-деформированных включений и напряжений в поврежденном слое. При этом изменение температуры облучения наглядно демонстрирует негативное влияние, выражающееся в более интенсивных снижениях твердости и прочности на изгиб, что в свою очередь, свидетельствует о более выраженной дестабилизации прочностных параметров, имеющих прямую корреляцию с результатами изменений величин объемно-деформированного распухания, концентрации аморфных включений, а также концентрации микронапряжений в поврежденном слое – параметров, свидетельствующих о деградации кристаллической структуры в процессе облучения. Анализ наблюдаемых изменений прочностных параметров показал, что увеличение температуры облучения приводит к более выраженной дестабилизации твердости и прочности на изгиб, снижение которых свидетельствует о деградации прочностных свойств керамик, а также снижении их устойчивости к внешним механическим воздействиям.

Определение влияния температурных факторов и связанных с ними эффектов объемного распухания на изменение прочностных свойств было рассмотрено в виде зависимостей величин степени структурного разупрочнения от величины объемного распухания. Результаты представлены на рисунке 8. Расчеты величин степени разупрочнения были проведены путем сравнительного анализа изменений величин твердости и прочности на изгиб облученных образцов с результатами данных величин в исходном состоянии, нормировка на 100% позволила определить степень деградации прочностных характеристик в зависимости от условий облучения.

В данном случае представленные зависимости отражают прямую взаимосвязь между изменениями структурных параметров, связанных с накоплением повреждений, а также влиянием диффузионных механизмов на разупорядочение, обусловленное ускорением миграции дефектов в поврежденном слое и деградацией прочностных параметров. При этом следует отметить, что изменение фазового состава керамик за счет вариации соотношения компонент приводит к повышению сопротивляемости к радиационным повреждениям и термическому расширению.



а)



б)

Рисунок 8. Результаты сравнительного анализа взаимосвязи между объемным распуханием и деградацией прочностных свойств керамик: твердости (а) и прочности на изгиб (б)

Как видно из представленных данных, тренд изменений величин степени разупрочнения (снижения твердости и прочности на изгиб) имеет прямую (линейную) корреляцию с изменениями величины атомных смещений, изменение которой связано с термическими эффектами, обуславливающими увеличение интенсивности распухания за счет термического расширения и увеличением диффузионной подвижности точечных и вакансионных дефектов. При этом наблюдаемые тренды изменений свидетельствуют о том, что при температуре облучения 1000 К увеличение флюенса облучения приводит к тому, что порядок изменения величин степени разупрочнения при флюенсах 10^{13} ион/см² сопоставим со степенью деградации прочностных параметров образцов керамик, облученных при температуре 300 К при флюенсе 10^{14} ион/см², из чего можно сделать вывод о том, что термические эффекты приводят к более интен-

сивной деградации прочностных свойств, при гораздо меньших флюенсах, что необходимо учитывать при прогнозировании потенциала использования данного типа керамик в качестве материалов инертных матриц. Таким образом, можно сделать вывод о том, что термическое воздействие при облучении в случае высоких флюенсов приводит к ускорению процессов дестабилизации поврежденного слоя, выражающейся в объемно-деформационном распухании и снижении прочностных характеристик выше допустимых значений (более 5% от начальных значений твердости и прочности на изгиб).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представлены результаты экспериментальных работ, связанных с изучением влияния температурных факторов на скорость деградации приповерхностного слоя $\text{Si}_3\text{N}_4 - \text{Al}_2\text{O}_3$ керамик в случае облучения тяжелыми ионами Xe^{23+} с энергией 230 МэВ. В ходе проведенных экспериментальных работ было установлено, что наиболее выраженные структурные изменения наблюдаются при достижении флюенсов облучения выше 10^{12} ион/см², при которых наблюдается увеличение плотности структурно-деформированных включений и их перекрытие, результатом которого является усиление процессов структурного разупорядочения, связанного с накоплением растягивающих микронапряжений и метастабильных аморфноподобных включений. В ходе проведенных исследований было установлено, что вне зависимости от вариации температуры облучения, основные структурные изменения обусловлены формированием в поврежденном слое деформационных напряжений растягивающего типа, а также накоплением концентрации метастабильных аморфноподобных включений, возникающих в случае сильного разупорядочения кристаллической решетки за счет деформационных искажений. При этом эффектов, связанных с образованием новых примесных фаз, в результате процессов полиморфных трансформаций или процессов рекристаллизации установлено не было, из чего можно сделать вывод о высокой стабильности кристаллической структуры $\text{Si}_3\text{N}_4 - \text{Al}_2\text{O}_3$ керамик к процессам фазовых трансформаций вне зависимости от температуры облучения.

Установлено, что увеличение температуры облучения ионами Xe^{23+} с 300 до 700 и 1000 К при флюенсе облучения $10^{13}-10^{14}$ ион/см² приводит к увеличению степени деградации структурных параметров, связанных с объемно-деформационным распуханием более чем в 1,5–2,6 раза, что в свою очередь свидетельствует о негативном влиянии термического расширения и диффузионных механизмах, способствующих ускорению процессов деструкции.

Дальнейшие планы исследований будут заключаться в определении эффективности применения предлагаемых типов композитных керамик в качестве материалов инертных матриц, а также проведении серийных испытаний на определение термостойко-

сти керамик и влияния концентрации радиационных повреждений на устойчивость к термическому воздействию.

Исследование финансируется Комитетом науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан (No. BR21882237).

ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES

1. Wang Y. et al. Micro and macro damage defects in heavy-ion irradiated MgO-Nd₂Zr₂O₇ composite ceramics used for inert matrix fuel // Journal of the European Ceramic Society. – 2024. – Vol. 44, No. 7. – P. 4804–4815.
2. Luzzi L. et al. Performance analysis and helium behaviour of Am-bearing fuel pins for irradiation in the MYRRHA reactor // Nuclear Engineering and Design. – 2024. – Vol. 420. – P. 113048.
3. Parveen R. et al. Investigation of radiation tolerance of yttria stabilized zirconia in the ballistic collision regime: Effect of grain size and environmental temperature // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms. – 2024. – Vol. 551. – P. 165344.
4. Ichinomiya T. et al. Temperature accelerated dynamics study of migration process of oxygen defects in UO₂ // Journal of nuclear materials. – 2009. – Vol. 384, No. 3. – P. 315–321.
5. He L. et al. Bubble evolution in Kr-irradiated UO₂ during annealing // Journal of Nuclear Materials. – 2017. – Vol. 496. – P. 242–250.
6. Onofri C. et al. Evolution of extended defects in polycrystalline UO₂ under heavy ion irradiation: combined TEM, XRD and Raman study // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms. – 2016. – Vol. 374. – P. 51–57.
7. Hung C. Y. et al. Evolution of extended defects in UO₂ during high temperature annealing // Journal of Nuclear Materials. – 2024. – Vol. 593. – P. 154997.
8. Charatsidou E. et al. Proton irradiation-induced cracking and microstructural defects in UN and (U, Zr) N composite fuels // Journal of Materiomics. – 2024. – Vol. 10, No. 4. – P. 906–918.
9. Banerjee R. H. et al. Radiation stability testing of hydrated and heat-treated magnesium potassium phosphates for back end nuclear fuel cycle applications // Ceramics International. – 2024. – Vol. 50, No. 1. – P. 2405–2414.
10. He J. et al. Influence of ion-induced lattice stress and phase transition on the irradiation resistance of high-entropy ceramics // Journal of the American Ceramic Society. – 2024. – Vol. 107, No. 1. – P. 615–623.
11. Koyanagi T. et al. Mechanical degradation of duplex SiC-fiber reinforced SiC matrix composite tubes under a controlled high-temperature steam environment // Ceramics International. – 2024. – P. 1–10.
12. He J. et al. Secondary phase evolution of high-entropy ceramics under heavy-ion irradiation in high-temperature coupling-induced environment // Scripta Materialia. – 2024. – Vol. 248. – P. 116145.
13. Borgekov D. B. et al. The effect of oxygen vacancies on the optical and thermophysical properties of (1-x) Si₃N_{4-x}Al₂O₃ ceramics // Optical Materials. – 2024. – Vol. 157. – P. 116056.

14. Козловский А. Л., Азамбаев С. Б., Абшукирова А. М. Изучение влияния вариации фазового состава композитных керамик на устойчивость к радиационным повреждениям // Вестник НЯЦ РК. – 2024. – Т. 4. – С. 164–174. [Kozlovskiy A. L., Azambaev S. B., Abshukirova A. M. Study of the influence of phase composition variation of composite ceramics on resistance to radiation damage // NNC RK Bulletin. – 2024. – Vol. 4. – P. 164–174. (In Russ.)]
15. Yan F. et al. The critical influencing factors responsible for the particle cracking in UMo/Zr dispersion fuel plates during post-irradiation anneal tests // Journal of Nuclear Materials. – 2024. – Vol. 593. – P. 154993.
16. Liu D., Wang Q., Zhang T. Phase-field simulation of the effect of grain boundary on fission gas migration in UO₂ fuel // Journal of Physics: Conference Series. – IOP Publishing, 2024. – Vol. 2749, No. 1. – P. 012001.
17. Jiang Y. et al. Effects of grain boundaries on the evolution of radiation-induced bubbles in polycrystalline tungsten: A phase-field simulation // Journal of Nuclear Materials. – 2024. – Vol. 588. – P. 154757.

КОМПОЗИТТИ КЕРАМИКАЛАРДА ҚҰРЫЛЫМДЫҚ ЗАҚЫМДАНУ ЖЫЛДАМДЫҒЫНА ТЕМПЕРАТУРАЛЫҚ ФАКТОРЛАРДЫҢ ӘСЕРІН ЗЕРТТЕУ

А. Л. Козловский^{1,2,3*}, С. Б. Азамбаев¹, М. Е. Кенжина^{2,3}, А. У. Толенова³

¹ Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Астана, Қазақстан

² ҚР Энергетика министрлігі «Ядролық физика институты» РМК, Алматы, Қазақстан

³ Satbayev University, Алматы, Қазақстан

* Байланыс үшін e-mail: kozlovskiy.a@inp.kz

Бұл жұмыста композитті керамикаларда ауыр иондармен сәулелену кезінде температураның құрылымдық әлсіреу және радиациялық зақымданудан туындайтын ретсіздену процестеріне әсері қарастырылған. Сәулелену температурасы 300-ден 1000 К-ге дейін өзгерді, бұл нақты жұмыс жағдайларына ең жақын радиациялық зақымдану процестерін модельдеуге мүмкіндік берді. Зерттеулер барысында қаттылық пен иілу беріктігінің әлсіреу дәрежесінің кристалл құрылымының көлемді-деформациялық ісіну мөлшеріне тәуелділігі анықталды, сондай-ақ температуралық эффектілердің керамикалардың құрылымдық және беріктік қасиеттерінің нашарлауына әсері зерттелді. Алынған деректерге сәйкес, зақымдалған қабаттағы аморфты қоспалардың концентрациясының артуы, оның сәулелену флюенсі мен температураға тәуелділігі, беріктік сипаттамаларының айқын төмендеуіне әкеледі. Бұл керамикалардың жоғары дозалы сәулелену кезінде әлсіреу процестеріне тұрақтылығын төмендетеді. Әлсіреу дәрежесінің температураға тікелей тәуелділігі анықталды, бұл инертті матрицалар ретінде осы материалдарды қолдану мүмкіндігін қарастыру кезінде олардың пайдалану мерзімін болжауда ескеруді қажет етеді. Сәулелену температурасының артуы қаттылық пен иілу беріктігінің флюенстері 10^{13} – 10^{14} ион/см² аралығында нашарлауына, яғни бастапқы мәндерден 5%-дан астамға төмендеуге әкелетін тұрақтылықтың айқын дестабилизациясын тудырады.

Түйін сөздер: композитті керамика, радиациялық зақымдану, температуралық факторлар, ақаулар, әлсіреу, деградация.

**STUDIES OF THE INFLUENCE OF TEMPERATURE FACTORS ON THE RATE
OF STRUCTURAL DAMAGE ACCUMULATION IN COMPOSITE CERAMICS**

A. L. Kozlovskiy^{1,2,3*}, S. B. Azambayev¹, I. E. Kenzhina^{2,3}, A. U. Tolenova³

¹ *L.N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, Kazakhstan*

² *RSE "Institute of Nuclear Physics" ME RK, Almaty, Kazakhstan*

³ *Satbayev University, Almaty, Kazakhstan*

* *E-mail for contacts: kozlovskiy.a@inp.kz*

The paper considers the influence of the temperature of heating under irradiation by heavy ions of composite ceramics on the processes of structural unstrengthening and disordering caused by the accumulation of radiation damage. The variation in irradiation temperature ranged from 300 to 1000 K, which made it possible to simulate radiation damage processes that were as close as possible to real operating conditions. The studies revealed a direct correlation between the changes in the degree of unstrengthening and bending strength disorder and the amount of volume-strain swelling of the crystal structure, as well as the contribution of thermal effects to the degradation of structural and strength properties of ceramics. According to the obtained data, it is established that the increase in the concentration of amorphous inclusions in the damaged layer, the presence of which has a direct dependence on both irradiation fluence and temperature, leads to a more expressed degradation of strength characteristics, indicating destabilization of ceramics resistance to the processes of unstrengthening at high-dose irradiation. Moreover, the degree of unstrengthening has a direct dependence on the irradiation temperature, which in case of considering the applicability of these ceramics as inert matrix materials requires consideration while predicting their operation lifetime. It was determined that the increase of irradiation temperature leads to more distinct destabilization of strength properties, in particular, decrease of hardness and bending strength at fluences of 10^{13} – 10^{14} ion/cm², the degradation of which exceeds the permissible values of 5% decrease from the initial values.

Keywords: *composite ceramics, radiation damage, temperature factors, defects, unstrengthening, degradation.*

<https://doi.org/10.52676/1729-7885-2025-1-132-139>

УДК: 539.213.26; МРНТИ 29.19.11; 29.19.21

ИЗУЧЕНИЕ КИНЕТИКИ СТРУКТУРНЫХ ПОВРЕЖДЕНИЙ В КОМПОЗИТНЫХ CER-CER КЕРАМИКАХ ПРИ ОБЛУЧЕНИИ ТЯЖЕЛЫМИ ИОНАМИ, СРАВНИМЫМИ С ОСКОЛКАМИ ДЕЛЕНИЯ ЯДЕРНОГО ТОПЛИВА

Ш. Г. Гиниятова¹, А. Л. Козловский^{1,2*}, Д. И. Шлимас^{1,2}

¹ Евразийский национальный университет им. Л.Н. Гумилева, Астана, Казахстан

² РГП «Институт ядерной физики» МЭ РК, Алматы, Казахстан

* E-mail для контактов: kozlovskiy.a@inp.kz

В работе представлены результаты оценки изменений структурных, прочностных и теплофизических параметров композитных керамик по типу сег-сег на основе оксидных соединений к радиационным повреждениям, вызванным высокотемпературным облучением тяжелыми ионами Kr^{15+} и He^{23+} . В ходе проведенных исследований установлены взаимосвязи между изменениями структурных параметров, обусловленных деформационным искажением кристаллической структуры и увеличением ее объема, с результатами оценки деградации прочностных и теплофизических параметров. Определено, что увеличение флюенса облучения приводит к накопительному эффекту деградации свойств керамик, при этом в случае облучения тяжелыми ионами He^{23+} эффект структурного разупорядочения и деградации прочностных и теплофизических параметров более выражен, чем в случае облучения ионами Kr^{15+} . Данное явление обусловлено различиями в величинах ионизационных потерь налетающих ионов, а также размерами поврежденных областей, возникающих в результате взаимодействия налетающих ионов с кристаллической структурой поврежденного слоя. При этом наиболее стабильными к радиационно-стимулированным процессам разупрочнения являются двухфазные $Al_2O_3 - ZrO_2$ керамики, в которых наличие межфазных границ приводит к увеличению сопротивляемости к разупрочнению и деструкции при высокодозном облучении. В качестве механизма сдерживания радиационных повреждений в случае двухфазных керамик рассматривается наличие межфазных границ, выступающих барьерными преградами, останавливающими диффузию точечных и вакансионных дефектов, а также снижающих степень структурного разупорядочения поврежденного слоя.

Ключевые слова: радиационные повреждения; композитные керамики; дефектные включения; разупорядочение; газовое распухание; теплопроводность.

ВВЕДЕНИЕ

На сегодняшний день одним из перспективных методов решения проблем в области энергетического сектора, связанных с отказом от углеводородов и снижением количества используемых ископаемых видов топлива для производства энергии, является расширение применимости альтернативных методов производства энергии [1, 2]. При этом среди альтернативных способов получения энергии большое внимание уделяется ядерной энергетике, увеличение доли которой в энергетическом секторе позволит решить большую часть вопросов, связанных с нехваткой энергоресурсов, а также со снижением вредных выбросов в атмосферу при сжигании ископаемого топлива (нефти, газа, угля). Наиболее перспективным решением в области увеличения мощностей ядерных реакторов, а также повышения сроков эксплуатации и степени выгорания ядерного топлива является перевод ядерных реакторов с классических твэлов на использование дисперсного ядерного топлива, в основе технологии которых лежит размещение делящегося ядерного материала в инертных матрицах (оксиды, нитриды, карбиды), использование которых позволяет увеличить устойчивость к радиационному охрупчиванию и распуханию (характерному для металлических сплавов и сталей), а также повысить темпе-

ратуру эксплуатации до 600–700 °С за счет высокой термической стабильности инертных керамик к тепловому расширению и высокотемпературной деградации [3–6]. Одним из классов материалов, предлагаемых для создания дисперсного топлива являются композиты по типу сег-сег, в основе которых лежит использование соединений двух типов керамик, совокупность свойств которых позволит создать инертную матрицу, обладающую высокой устойчивостью к внешним воздействиям (механическим, коррозионным, высокотемпературному нагреву), а также к радиационному охрупчиванию и газовому распуханию, которые являются одними из сдерживающих факторов, определяющих перспективность использования композитных керамик в качестве инертных матриц дисперсного ядерного топлива [7, 8]. При этом немаловажную роль в изучении применимости подобных керамик уделяется изучению фундаментальных основ накопления радиационных повреждений и структурных изменений в инертных матрицах, сравнимых с реальными условиями воздействия, знание которых позволит спрогнозировать поведение материалов при высокодозном радиационном воздействии, а также установить пределы допустимых изменений свойств керамик в результате воздействия ионизирующего излучения. Результаты подобных исследова-

ний в дальнейшем могут послужить для расширения общих представлений механизмов взаимодействия налетающих ионов с кристаллической структурой керамик, а также оценить кинетику накопления повреждений в зависимости от флюенса (дозы или величины атомных смещений), что позволит определить критически допустимые дозы облучения, при достижении которых происходит ускорение процессов деструкции и дестабилизации поврежденного слоя [9–12].

Цель данного исследования заключается в определении влияния высокотемпературного облучения тяжелыми ионами Kr^{15+} и He^{23+} с энергиями 150 и 230 МэВ, воздействие которых сравнимо с воздействием осколков деления ядерного топлива на изменение структурных, прочностных и теплофизических параметров композитных керамик по типу сег-сег. Выбор типов ионов для облучения, а также флюенсов и температуры облучения обусловлен возможностями моделирования максимально приближенных условий накопления радиационных повреждений в приповерхностном слое сег-сег керамик к реальным условиям эксплуатации данных керамик при использовании их в качестве материалов инертных матриц дисперсного ядерного топлива в реакторах нового поколения. При этом выбор сег-сег керамик в качестве объектов исследований обусловлен возможностями увеличения стабильности к радиационно-индуцированным процессам деструкции керамик, что в свою очередь позволит увеличить срок их эксплуатации в качестве материалов инертных матриц, а также увеличить глубину выгорания ядерного топлива, которого сопровождается большим количеством структурных искажений, вызванных воздействием осколков деления [12–14]. Концепция использования композитных сег-сег керамик в качестве основы для создания инертных матриц дисперсного ядерного топлива заключается в возможности увеличения сроков эксплуатации топливных элементов за счет увеличения глубины выгорания, а также увеличения сопротивляемости инертного материала к деструктивному охрупчиванию и разупорядочению при высокодозном воздействии осколков деления ядерного топлива в зоне соприкосновения делящегося ядерного материала и инертной матрицы.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Интерес к изучению радиационных повреждений, а также их накоплению в приповерхностном слое керамик – материалов инертных матриц дисперсного ядерного топлива, обусловлен возможностями получения данных о поведении материалов ядерного топлива при длительной эксплуатации в условиях воздействия осколков деления (He , Kr с энергиями 150–250 МэВ). При этом наибольшему радиационному воздействию подвергается приповерхностный слой толщиной 15–20 мкм, деструкция которого под действием накопления радиационных повреждений может привести к разупрочнению и охрупчиванию, что

впоследствии может инициировать процессы локального перегрева за счет ухудшения теплофизических параметров, а также разрушению материала инертной матрицы. Также следует отметить, что в силу своей природы накопление осколков деления может привести к возникновению газовых включений при их агломерации и последующему деформационному искажению кристаллической структуры. Для моделирования данных процессов с целью определения оптимальных составов керамик, обладающих высокой радиационной стойкостью и повышенной сопротивляемостью к разупрочнению и деградации теплофизических и прочностных свойств, как правило, используют метод облучения тяжелыми ионами, выбор типа и энергии которых обусловлен возможностью моделирования ситуаций, максимально приближенных к реальным условиям, эксплуатации данных материалов в качестве инертных матриц.

В качестве объектов исследований были выбраны керамики по типу сег-сег, полученные с применением метода механохимического синтеза путем смешивания комбинаций двух оксидов с целью получения композитных керамик, обладающих повышенной устойчивостью к распуханию и деградации. Смешивание порошков для получения композитных керамик проводилось в планетарной мельнице PULVERISSETTE 6 (Fritsch, Берлин, Германия), термическая обработка перемолотых порошков проводилась в муфельной печи ПМ-1700 (Русуниверсталь, г. Челябинск, Россия), позволяющей отжигать образцы при высоких температурах с поддержанием заданной температуры в течение длительного времени (порядка 8 часов).

В таблице 1 представлены данные структурных параметров исследуемых образцов, а также условия их получения. Выбор данных типов керамик на основе соединений оксида алюминия с другими типами оксидов (SiO_2 , NiO , Bi_2O_3 , ZrO_2 , MgO) обусловлен возможностями вариации их физико-химическими, прочностными и теплофизическими параметрами, за счет сочетания данных характеристик оксидов и получения структур шпинельного типа (кубические шпинели) или же орторомбических сложных оксидов. При этом данные композитные керамики по типу сег-сег обладают большими перспективами в области использования их в качестве материалов инертных матриц дисперсного топлива, способного эксплуатироваться в режимах высоких температур, так как данные оксидные соединения имеют высокие температуры плавления (выше $2000^{\circ}C$), а также хорошие прочностные свойства (более 600–700 НВ).

Определение структурных параметров и фазового состава исследуемых образцов сег-сег керамик, результаты которых представлены в таблице 1, было осуществлено с применением метода рентгеноструктурного анализа. Данные измерения проводились на порошковом дифрактометре D8 Advance ECO (Bruker, Германия), съемка дифрактограмм проводи-

**ИЗУЧЕНИЕ КИНЕТИКИ СТРУКТУРНЫХ ПОВРЕЖДЕНИЙ В КОМПОЗИТНЫХ CER-CER КЕРАМИКАХ
ПРИ ОБЛУЧЕНИИ ТЯЖЕЛЫМИ ИОНАМИ, СРАВНИМЫМИ С ОСКОЛКАМИ ДЕЛЕНИЯ ЯДЕРНОГО ТОПЛИВА**

Таблица 1. Данные исследуемых образцов

№	Материал / соотношение компонент	Условия получения	Фазовый состав керамик
1	Al ₂ O ₃ – SiO ₂ / 1:1	Механохимическое перемалывание при скорости помола 400 оборот/мин в течение 5 часов. Термический отжиг образцов при температуре 1500 °С в течение 8 часов и последующее остывание образца в течение 24 часов вместе с печью.	Al ₂ SiO ₅ – Orthorhombic Pbnm(62) (PDF-01-074-0274) a=7,4754 Å, b=7,6753 Å, c=5,7778 Å, V=331,5 Å ³
2	Al ₂ O ₃ – NiO / 1:1		NiAl ₂ O ₄ Cubic Fd-3m(227) (PDF-00-010-0339) a=8,0512 Å, V=521,9 Å ³
3	Al ₂ O ₃ – Bi ₂ O ₃ / 1:1		Bi ₂ Al ₄ O ₉ – Orthorhombic Pbam(55) (PDF-01-083-7824) a=7,7779 Å, b=8,1587 Å, c=5,7395 Å, V=364,3 Å ³
4	Al ₂ O ₃ – ZrO ₂ / 1:1		Al ₂ O ₃ Rhombo.H.axes R-3c(167) (PDF-00-046-1212) a=4,7278 Å, c=12,9292 Å, V=250,5 Å ³ ; ZrO ₂ Monoclinic P21/a(14) (PDF-00-065-0728) a=5,2899 Å, b=5,1896 Å, c=5,1359 Å, β=99,173°, V=139,1 Å ³ ; Соотношение фаз Al ₂ O ₃ /ZrO ₂ составляет 40/60.
5	Al ₂ O ₃ – MgO / 1:1		MgAl ₂ O ₄ – Cubic Fd-3m(227) (PDF-04-073-1959) a=7,9964 Å, V=511,3 Å ³

лась в геометрии Брегг – Брентано, что позволило получить ряд дифрактограмм, характерных для поликристаллических структур, с различным фазовым составом, изменение которого варьируются за счет изменения типов используемых оксидов для получения керамик. В ряде случаев, получаемые образцы представляют собой поликристаллические однофазные структуры, обладающие достаточно высокими показателями степени структурного упорядочения, которые обусловлены методом их изготовления при механохимическом перемалывании и последующем термическом отжиге, использование которого при выбранных условиях позволяет инициировать процессы фазовых трансформаций в образцах, приводящие к формированию высокоупорядоченных структур.

Моделирование радиационных повреждений в приповерхностном слое было выполнено на ускорителе тяжелых ионов ДЦ-60 (ИЯФ, г. Астана, Казахстан). Для моделирования структурных и прочностных изменений в приповерхностном слое толщиной 15–20 мкм были выбраны тяжелые ионы Кг¹⁵⁺ и Хе²³⁺ с энергиями 150 и 230 МэВ соответственно. Облучение было проведено при температуре 1000 К с флюенсами 10¹¹–10¹⁵ ион/см². Выбор условий облучения обусловлен возможностью моделирования механизмов радиационных повреждений, наиболее приближенных к реальным условиям эксплуатации ядерного дисперсного топлива, в условиях работы высокотемпературных ядерных реакторов [3, 15, 16]. Поддержание температуры облучения осуществлялось с использованием специального держателя-нагревателя, использование которого позволяет поддерживать постоянную температуры образцов в ходе длительных экспериментов по облучению. Контроль за тем-

пературой осуществлялся с использованием термопар, закрепленных с двух сторон образцов, позволяющих определить скорость прогрева образцов. А также определения степени стабилизации температуры в образце в ходе всего облучения. Использование термопар для контроля температуры образцов в ходе облучения также позволяет оценить возможное формирование термических эффектов, связанных с трансформацией кинетической энергии налетающих ионов в тепловую.

Оценка накопления радиационных повреждений в результате увеличения флюенса облучения, связанных с увеличением деформационных искажений и остаточных механических напряжений в поврежденном слое керамик, была выполнена с применением метода рентгеноструктурного анализа. Для оценки использовались данные изменений величин объема и параметров кристаллической решетки, изменения которых позволяют оценить степень структурных искажений, характер накопленных остаточных механических напряжений (растягивающий или сжимающий), а также концентрацию дефектной фракции в поврежденном слое.

Определение эффекта разупрочнения поврежденного слоя проводилось с применением метода индентирования (измерения твердости) образцов в исходном и облученном состоянии. Измерения проводились с использованием микротвердомера Duroline M1 (Metkon, Бурса, Турция), в качестве метода оценки твердости использовался метод Виккерса, в котором в качестве индентера использовалась алмазная пирамидка с углом 136° между противоположными гранями, в результате использования которого получается отпечаток в виде четырехгранной пирамиды.

Определение влияния радиационных повреждений в случае высокотемпературного облучения тяжелыми ионами на изменение теплофизических параметров проводилось с применением метода оценки изменений коэффициента теплопроводности исследуемых образцов в зависимости от флюенса облучения. Результаты измерений были получены путем использования метода оценки прямого теплового потока через образец с использованием системы термопар и универсального прибора для измерения теплопроводности КИТ-800 (Теплофон, Россия). Для определения величины коэффициента теплопроводности использовался диапазон измеряемых температур от 25 до 800 °С, на основе изменений которого были определены средние значения коэффициента теплопроводности. Определение деградации коэффициента теплопроводности было осуществлено путем сравнительного анализа полученных изменений величин коэффициента теплопроводности в зависимости от флюенса облучения тяжелыми ионами с последующим сравнением со значениями, полученными для исходных образцов и вычислением разницы, отражающей ухудшение теплофизических параметров за счет увеличения тепловых потерь в поврежденном слое.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

На рисунке 1 представлены данные изменения величины ΔV , описывающей деформационное изменение объема кристаллической решетки в сравнении с данными исходных значений. Результаты представлены в виде зависимостей изменения величины ΔV от флюенса облучения для всех исследуемых образцов, погрешность измерений определялась путем изучения серии образцов каждой партии состоящих минимум из пяти образцов для набора статистических данных, а также вычисления среднеквадратичного отклонения. Результаты оценки изменений ΔV , представленные на графиках рисунка 1 свидетельствуют о накопительном эффекте структурных искажений, имеющих прямую корреляцию с изменением величины флюенса облучения, при этом различия в величинах ΔV для различных типов керамик свидетельствуют о различной устойчивости керамик к внешним воздействиям и деформационным искажениям, вызванным облучением. Следует также отметить, что наиболее данный эффект проявлен в случае высокодозного облучения при флюенсах выше 10^{13} ион/см², для которых, как известно из ряда экспериментальных работ [17, 18], характерно формирование эффекта перекрытия образующихся дефектных областей, возникающих в результате взаимодействия налетающих ионов с кристаллической структурой в результате упругих и неупругих соударений.

Как видно из представленных данных, характер изменения величины деформационного искажения объема кристаллической решетки свидетельствует о растягивающих деформационных искажениях, связанных с формированием остаточных механических

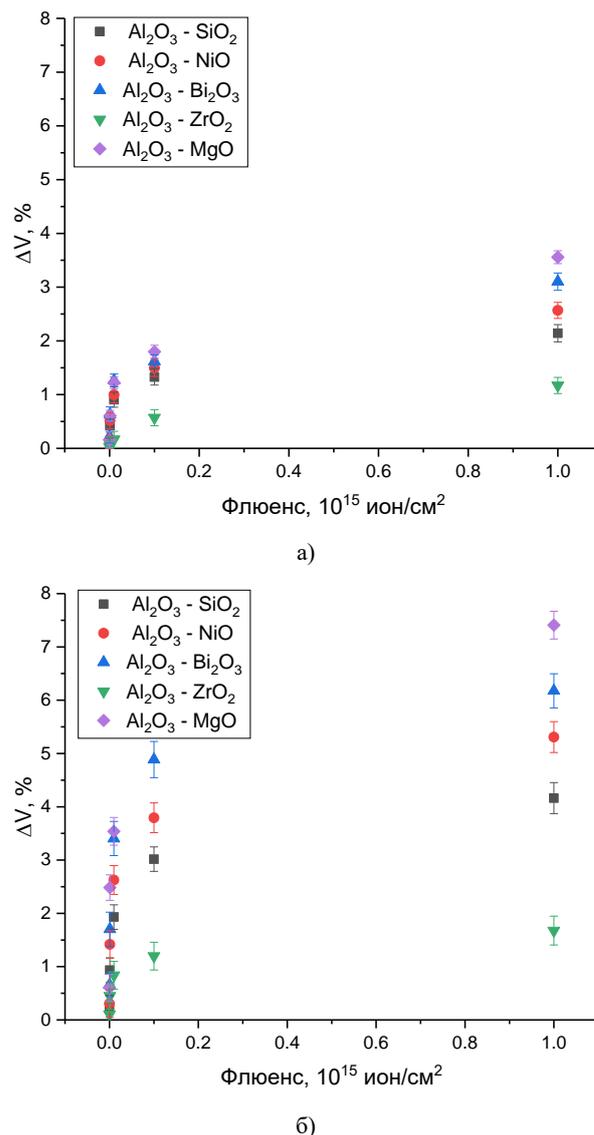


Рисунок 1. Данные деформационного изменения объема кристаллической решетки в результате накопления радиационных повреждений при облучении тяжелыми ионами Kr^{15+} (а) и Xe^{23+} (б)

напряжений, а также структурных искажений, вызванных накоплением радиационных повреждений. При этом увеличение величины ΔV в зависимости от флюенса облучения свидетельствует о формировании в структуре приповерхностного слоя керамик газонаполненных включений, которые возникают в результате накопления имплантированных тяжелых ионов в поврежденном слое. Накопление данных включений приводит к дестабилизации кристаллической структуры, а также ее разупорядочению, которое выражается в увеличении объема кристаллической решетки, и как следствие, росту величины ΔV при увеличении флюенса облучения. При этом наблюдаемые тенденции роста величины ΔV для исследуемых образцов в зависимости от флюенса облучения свидетельствуют о накопительном эффекте, свя-

занном как с увеличением концентрации структурных искажений, вызванных взаимодействием налетающих ионов с кристаллической структурой, так и эффектами перекрытия дефектных областей (наиболее данный эффект проявляется для флюенсов облучения выше 10^{13} ион/см²).

В случае исследуемых керамик, как видно из представленных данных, изменение типа ионов с Kr^{15+} на Xe^{23+} приводит практически к двукратному увеличению деформационных искажений кристаллической структуры, что обусловлено эффектами увеличения ионизационных потерь налетающих ионов и, как следствие, увеличение деформационных искажений кристаллической решетки в результате упругих и неупругих соударений. Наблюдаемые различия в трендах изменений величины ΔV от флюенса облучения в сравнении для двух типов ионов позволяют сделать вывод о том, что в случае облучения тяжелыми ионами Xe^{23+} эффекты структурного разупрочнения более выражены, так как это обусловлено как большими величинами ионизационных потерь при взаимодействии ионов Xe^{23+} с кристаллической структурой, что в свою очередь приводит к увеличению размеров поврежденных областей, так и большей концентрацией вакансионных и точечных дефектов, образующихся в результате соударений ионов с кристаллической структурой.

При этом увеличение флюенса облучения приводит к увеличению деформационных искажений, что свидетельствует о накопительном эффекте структурных изменений, вызванных облучением. Стоит отметить также, что деформационные искажения, связанные с накоплением структурных искажений, а также остаточными механическими напряжениями, вызванными облучением, могут привести к ухудшению прочностных и теплофизических параметров, связанному с образованием дефектных включений и областей разупорядочения в поврежденном слое. При этом накопление данных включений может привести к резкому ухудшению свойств керамик.

Согласно полученным данным наиболее устойчивыми к процессам распухания и деградации кристаллической структуры проявили керамики на основе $Al_2O_3 - ZrO_2$, повышение устойчивости для которых обусловлено эффектами наличия межфазных границ и повышенной дислокационной плотности, обусловленной эффектами наличия мелкодисперсных зерен, а также физико-химическими свойствами данных соединений. Наихудшей устойчивостью к радиационным повреждениям, а также распуханию кристаллической структуры обладают керамики со шпинельным типом кристаллической решетки, полученные на основе соединений $Al_2O_3 - NiO$ и $Al_2O_3 - MgO$. Такое поведение керамик обусловлено низкой устойчивостью данных соединений к структурным искажениям, связанным с деформационными напряжениями, накопление которых происходит в процессе вза-

имодействия налетающих ионов с кристаллической структурой керамик.

На рисунке 2 представлены результаты оценки изменения прочностных характеристик керамик, связанных с накоплением структурных изменений в поврежденном приповерхностном слое, определенные с применением метода индентирования с использованием твердомера с постоянной нагрузкой на индентер в 100 Н.

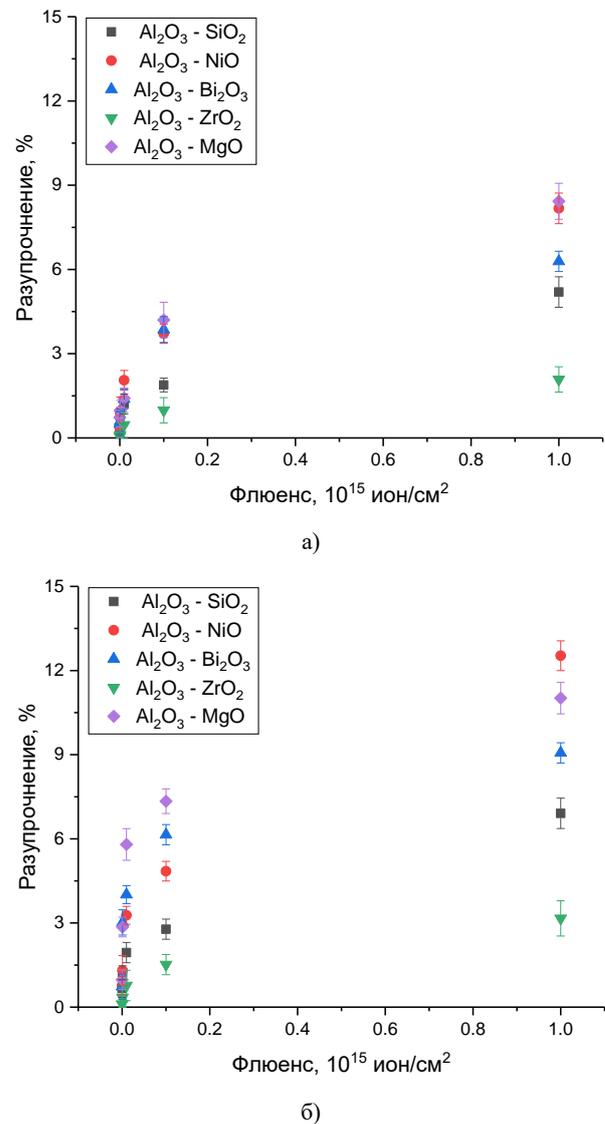


Рисунок 2. Результаты изменения величины разупрочнения керамик в результате внешних воздействий, связанных с облучением тяжелыми ионами Kr^{15+} (а), Xe^{23+} (б) и последующим разупрочнением

Общий вид наблюдаемых изменений прочностных характеристик свидетельствует о влиянии деформационного искажения и распухания на разупрочнение поврежденного слоя керамик. При этом наиболее выражены данные изменения при облучении ионами Xe^{23+} , для которых при максимальном флюенсе облучения снижение твердости приповерхност-

ного слоя составляет более 9–12% для керамик со шпинельным типом кристаллической решетки, а также менее 3% для керамик на основе $\text{Al}_2\text{O}_3 - \text{ZrO}_2$.

Одним из критериев отбора материалов инертных матриц дисперсного ядерного топлива является сохранение их стабильности теплофизических параметров (коэффициента теплопроводности) к накоплению радиационных повреждений. Так как керамики обладают диэлектрической природой, основным механизмом передачи тепла в них является фононный механизм, который основан на обмене тепла за счет движения фононов в материале. В этом случае, наличие структурных искажений и дефектов, возникающих при накоплении радиационных повреждений приведет к созданию дополнительных препятствий для движения фононов, тем самым увеличивая их рассеяния и снижая скорость, что в свою очередь приводит к ухудшению теплопроводности. Результаты изменения величины коэффициента теплопроводности ΔK_t , отражающих ухудшение теплопроводности, вызванное облучением и накоплением радиационных повреждений, представлены на рисунке 3. Результаты представлены в виде зависимости изменения величины теплопроводности в сравнении с исходными значениями для каждого образца, отражающие степень деградации теплопроводности при накоплении структурных повреждений, вызванных облучением.

Как видно из представленных данных изменений теплофизических параметров (снижение коэффициента теплопроводности), наиболее устойчивыми керамиками к деградации теплопроводящих свойств являются керамики на основе $\text{Al}_2\text{O}_3 - \text{ZrO}_2$, для которых изменение величины составляет менее 1,5% для облучения ионами Kr^{15+} и не более 3% при облучении ионами Xe^{23+} . При этом наименее устойчивыми керамиками к ухудшению теплофизических параметров обладают керамики со шпинельным типом фазового состава, полученных на основе соединений $\text{Al}_2\text{O}_3 - \text{NiO}$ и $\text{Al}_2\text{O}_3 - \text{MgO}$. Такое различие в величинах деградации коэффициента теплопроводности в данном случае может быть объяснено эффектами структурных искажений, связанных с накоплением в поврежденном слое дефектных включений и газонаполненных областей, наличие которых приводит к дестабилизации кристаллической структуры, и как следствие, снижению теплопроводности, деградация которой обусловлена увеличением тепловых потерь за счет эффекта перерассеяния фононов на дефектных включениях. В свою очередь сравнения результаты изменений структурных параметров, выраженных в изменении величины ΔV (см. данные на рисунке 1) с результатами изменений величины коэффициента теплопроводности можно найти прямую корреляцию между данными параметрами, из чего следует сделать вывод о том, что деградация теплопроводности, связанная с ростом тепловых потерь, обусловлена концентрацией структурных искажений в повре-

жденном слое керамик, увеличение которых приводит к дестабилизации как прочностных, так и теплофизических параметров.

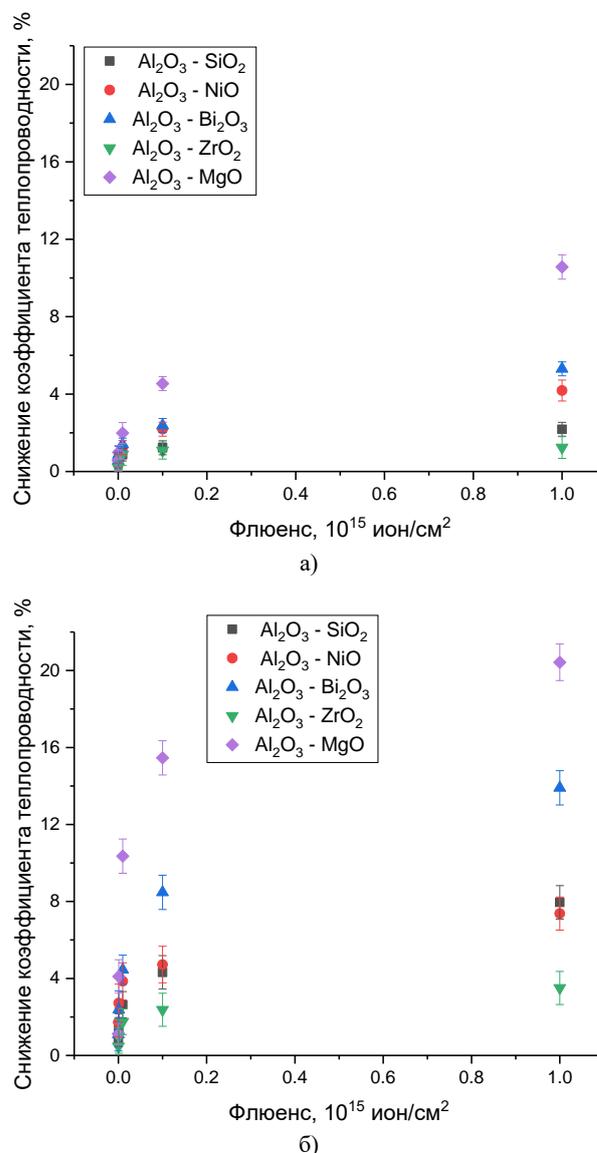


Рисунок 3. Результаты изменения величины коэффициента теплопроводности в зависимости от флюенса облучения тяжелыми ионами Kr^{15+} (а) и Xe^{23+} (б)

Наблюдаемый эффект менее выраженных изменений коэффициента теплопроводности и прочностных параметров для образцов $\text{Al}_2\text{O}_3 - \text{ZrO}_2$ керамик в сравнении с другими типами керамик обусловлен наличием двух фаз в составе керамик, что создает дополнительные барьеры для миграции точечных и вакансионных дефектов в поврежденном слое, которая усилена температурными эффектами, связанными с облучением при высоких температурах и, как следствие, термическим расширением кристаллической структуры. В данном случае наличие межфазных границ в составе $\text{Al}_2\text{O}_3 - \text{ZrO}_2$ керамик приводит к торможению диффузии дефектов, сдерживая их вблизи

границ зерен, тем самым снижая их агломерацию (доказательство данного эффекта заключается в результатах изменений величины ΔV в зависимости от типов ионов облучения и флюенса облучения), что в свою очередь приводит к менее выраженным эффектам деградации прочностных характеристик и изменений теплопроводности.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе проведенных исследований установлены зависимости влияния фазового состава керамик по типу cer-cer на степень радиационно-индуцированного разупрочнения и деградации прочностных и теплофизических параметров при облучении тяжелыми ионами Kr^{15+} и Xe^{23+} с флюенсами 10^{11} – 10^{15} ион/см².

В ходе проведенных исследований было установлено, что наиболее устойчивыми к газовому распуханию приповерхностного слоя, а также деградации прочностных и теплофизических параметров керамик обладают $Al_2O_3 - ZrO_2$, устойчивость которых обусловлено наличием межфазных границ зерен, а также наличием дополнительных дислокаций, обусловленных мелкозернистой фракцией. При этом, анализируя полученные данные, наименее устойчивыми к радиационным повреждениям являются керамики со шпинельным типом кристаллической решетки, полученные на основе оксидных соединений $Al_2O_3 - NiO$ и $Al_2O_3 - MgO$.

На основе проведенных исследований было установлено, что керамики на основе $Al_2O_3 - ZrO_2$ являются наиболее перспективными материалами для создания на их основе инертных матриц для дисперсного ядерного топлива, за счет высокой устойчивости к внешним воздействиям, а также сохранению стабильности к процессам газового распухания и последующей деформации, связанной с частичной аморфизацией и накоплением остаточных механических напряжений.

Исследование финансируется Комитетом науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан (AP19679979).

ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES

1. Golosov O. A. et al. Corrosive and mechanical resistance of MgO ceramics under metallizing and mild chlorination of spent nuclear fuel in molten salts // *Ceramics International*. – 2021. – Vol. 47, No. 3. – P. 3306–3311.
2. Evarts J. S. et al. Ceramic–Metal (Cermet) Composites: A Review of Key Properties and Synthesis Methods Focused on Nuclear Waste Immobilization // *Industrial & Engineering Chemistry Research*. – 2024. – Vol. 63, No. 14. – P. 6003–6023.
3. Liu Y. et al. Irradiation response of Al_2O_3 - ZrO_2 ceramic composite under He ion irradiation // *Journal of the European Ceramic Society*. – 2021. – Vol. 41, No. 4. – P. 2883–2891.
4. Alekseeva L. S. et al. Radiation resistance of fine-grained YAG: Nd ceramics irradiated with swift heavy multi-charged Ar and Xe ions // *Ceramics International*. – 2024. – Vol. 50, No. 24. – P. 55251–55262.
5. Wei H. et al. Modeling of irradiation-induced thermo-mechanical coupling and multi-scale behavior in a fully ceramic-microencapsulated fuel pellet // *Journal of Nuclear Materials*. – 2021. – Vol. 544. – P. 152673.
6. Zacharie-Aubrun I. et al. Effects of irradiation on mechanical properties of nuclear UO_2 fuels evaluated by Vickers indentation at room temperature // *Journal of Nuclear Materials*. – 2021. – Vol. 547. – P. 152821.
7. D'Agata E. et al. The behaviour under irradiation of molybdenum matrix for inert matrix fuel containing americium oxide (CerMet concept) // *Journal of Nuclear Materials*. – 2015. – Vol. 465. – P. 820–834.
8. Lee W. E. et al. Opportunities for advanced ceramics and composites in the nuclear sector // *Journal of the American Ceramic Society*. – 2013. – Vol. 96, No. 7. – P. 2005–2030.
9. Sauder C. Ceramic matrix composites: nuclear applications // *Ceramic matrix composites: materials, modeling and technology*. – 2014. – P. 609–646.
10. Bonal J. P. et al. Graphite, ceramics, and ceramic composites for high-temperature nuclear power systems // *MRS bulletin*. – 2009. – Vol. 34, No. 1. – P. 28–34.
11. Castro L. et al. Thermal analysis of ceramic nuclear fuels for the HPLWR // *Annals of Nuclear Energy*. – 2019. – Vol. 127. – P. 227–236.
12. Toulemonde M., Bouffard S., Studer F. Swift heavy ions in insulating and conducting oxides: tracks and physical properties // *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*. – 1994. – Vol. 91, No. 1–4. – P. 108–123.
13. Kamarou A. et al. Swift heavy ion irradiation of InP: Thermal spike modeling of track formation // *Physical Review B: Condensed Matter and Materials Physics*. – 2006. – Vol. 73, No. 18. – P. 184107.
14. Naslain R. Design, preparation and properties of non-oxide CMCs for application in engines and nuclear reactors: an overview // *Composites Science and Technology*. – 2004. – Vol. 64, No. 2. – P. 155–170.
15. Ishikawa N., Taguchi T., Ogawa H. Comprehensive understanding of hillocks and ion tracks in ceramics irradiated with swift heavy ions // *Quantum Beam Science*. – 2020. – Vol. 4, No. 4. – P. 43.
16. Beauvy M. et al. Damages in ceramics for nuclear waste transmutation by irradiation with swift heavy ions // *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*. – 2006. – Vol. 242, No. 1–2. – P. 557–561.
17. Rymzhanov R. A. et al. Overlap of swift heavy ion tracks in Al_2O_3 // *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*. – 2018. – Vol. 435. – P. 121–125.
18. García G. et al. Amorphization kinetics under swift heavy ion irradiation: A cumulative overlapping-track approach // *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*. – 2011. – Vol. 269, No. 4. – P. 492–497.

**ЯДРОЛЫҚ ОТЫННЫҢ БӨЛІНУ СЫНЫҚТАРЫМЕН САЛЫСТЫРЫЛАТЫН АУЫР ИОНДАРМЕН
СӘУЛЕЛЕНУ КЕЗІНДЕ КОМПОЗИТТІК CER-CER КЕРАМИКАЛАРЫНДАҒЫ ҚҰРЫЛЫМДЫҚ
ЗАҚЫМДАНУ КИНЕТИКАСЫН ЗЕРТТЕУ**

Ш. Г. Гиниятова¹, А. Л. Козловский^{1,2*}, Д. И. Шлимас^{1,2}

¹ *Л. Н. Гумилев Еуразия ұлттық университеті, Астана, Қазақстан*

² *ҚР Энергетика министрлігі «Ядролық физика институты» РМК, Алматы, Қазақстан*

* *Байланыс үшін e-mail: kozlovskiy.a@inp.kz*

Жұмыста ауыр Kr^{15+} және Xe^{23+} иондарының жоғары температуралық сәулеленуінен туындаған радиациялық зақымдануға оксидті қосылыстар негізінде cer-cer типіндегі композиттік керамиканың құрылымдық, беріктік және жылу-физикалық параметрлерінің өзгерістерін бағалау нәтижелері келтірілген. Жүргізілген зерттеулер барысында кристалдық құрылымның деформациялық бұрмалануына және оның көлемінің ұлғаюына байланысты құрылымдық параметрлердің өзгеруі мен беріктік және жылу-физикалық параметрлердің деградациясын бағалау нәтижелері арасында өзара байланыс орнатылды. Сәулелену флюенсінің жоғарылауы керамика қасиеттерінің деградациясының кумулятивті әсеріне әкелетіні анықталды, ал ауыр иондармен сәулелену жағдайында Xe^{23+} құрылымдық ретке келтіру және беріктік пен термофизикалық параметрлердің деградациясының әсері Kr^{15+} иондарымен сәулелену жағдайына қарағанда айқынырақ болады. Бұл құбылыс ұшатын иондардың иондану шығындарының шамаларындағы айырмашылықтарға, сондай-ақ ұшатын иондардың зақымдалған қабаттың кристалдық құрылымымен әрекеттесуі нәтижесінде пайда болатын зақымдалған аймақтардың мөлшеріне байланысты. Сонымен қатар, екі фазалы $Al_2O_3 - ZrO_2$ керамикасы радиациялық ынталандырылған тазарту процестеріне ең тұрақты болып табылады, онда фазааралық шекаралардың болуы жоғары дозалы сәулелену кезінде тозуға және деструкцияға төзімділіктің артуына әкеледі. Екі фазалы керамика жағдайында радиациялық зақымдануды тежеу механизмі ретінде нүктелік және бос ақаулардың диффузиясын тоқтататын, сондай-ақ зақымдалған қабаттың құрылымдық реттелу дәрежесін төмендететін тосқауыл ретінде әрекет ететін фазааралық шекаралардың болуы қарастырылады.

Түйін сөздер: *радиациялық зақымдану; композициялық керамика; ақаулы қосындылар; бұзылу; газдың ісінуі; жылу өткізгіштік.*

**STUDY OF THE KINETICS OF STRUCTURAL DAMAGE
IN COMPOSITE CER-CER CERAMICS UNDER IRRADIATION WITH HEAVY IONS
COMPARABLE TO NUCLEAR FUEL FISSION FRAGMENTS**

Sh. G. Ginivatova¹, A. L. Kozlovskiy^{1,2*}, D. I. Shlimas^{1,2}

¹ *L.N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, Kazakhstan*

² *RSE "Institute of Nuclear Physics" ME RK, Almaty, Kazakhstan*

* *E-mail for contacts: kozlovskiy.a@inp.kz*

The paper presents the assessment results of changes in the structural, strength and thermal parameters of cer-cer composite ceramics based on oxide compounds to radiation damage caused by high-temperature irradiation with heavy Kr^{15+} and Xe^{23+} ions. During the studies conducted, relationships between changes in structural parameters caused by deformation distortion of the crystalline structure and an increase in its volume, with the assessment results of the degradation of strength and thermal parameters, were established. It was determined that an elevation in the irradiation fluence leads to a cumulative effect of degradation of the properties of ceramics, while in the case of irradiation with heavy Xe^{23+} ions, the effect of structural disordering and degradation of strength and thermal parameters is more pronounced than in the case of irradiation with Kr^{15+} ions. This phenomenon is caused by differences in the value of ionization losses of incident ions, as well as the size of damaged areas that arise as a result of the interaction of incident ions with the crystalline structure of the damaged layer. At the same time, the most stable to radiation-stimulated softening processes are two-phase $Al_2O_3 - ZrO_2$ ceramics, in which the presence of interphase boundaries leads to a growth in resistance to softening and destruction under high-dose irradiation. The presence of interphase boundaries acting as barriers that stop the diffusion of point and vacancy defects and reduce the degree of structural disorder of the damaged layer is considered as a mechanism for containing radiation damage in the case of two-phase ceramics.

Keywords: *radiation damage; composite ceramics; defective inclusions; disorder; gas swelling; thermal conductivity.*

<https://doi.org/10.52676/1729-7885-2025-1-140-147>
УДК 538.94

ВЛИЯНИЕ ДОПИРОВАНИЯ Rh НА АКТИВНОСТЬ РЕАКЦИИ ВЫДЕЛЕНИЯ КИСЛОРОДА НА ПОВЕРХНОСТЯХ BaTiO₃(001)

А. У. Абуова¹, У. Ж. Толеген^{1*}, Ф. У. Абуова¹, Т. М. Инербаев¹,
С. А. Нуркенов², Ж. Е. Зэкиева², Г. А. Каптагай³

¹ Евразийский национальный университет им. Л.Н. Гумилева, Астана, Казахстан

² Международный университет Астана, Астана, Казахстан

³ Казахский национальный женский педагогический университет, Алматы, Казахстан

* E-mail для контактов: t-ulzhan@list.ru

Фотоиндуцированное расщепление воды с использованием фотокатализаторов в виде наночастиц является многообещающим и простым способом получения экологически чистого водорода. В настоящей работе мы исследуем потенциал модифицированного титаната бария (BaTiO₃), недорогого оксида перовскита, получаемого из широко распространенных на земле прекурсоров, для разработки эффективных фотокатализаторов окисления воды, используя расчеты из первых принципов.

Было показано, что терминирующая TiO₂ BaTiO₃(001) поверхность, является более перспективной с точки зрения ее использования в качестве катализатора. После замены Ti на Rh легирующий ион может перенять часть электронной плотности у соседних ионов кислорода. В результате во время реакции окисления воды ионы родия могут находиться в промежуточной степени окисления между 3+ и 4+. Это влияет на энергию адсорбции промежуточных продуктов реакции на поверхности катализатора, снижая величину избыточного потенциала.

Ключевые слова: фотокатализ, фотокатализ, титанат бария, ширина запрещенной зоны, перовскит, электродные материалы, расщепление воды.

ВВЕДЕНИЕ

По мере того, как общество движется к более экологически чистым источникам энергии, расщепление воды привлекает все большее внимание как метод производства чистого водорода [1–4]. Современное производство водорода предполагает значительное использование ископаемого топлива, что сводит на нет положительные эффекты производства экологически чистого топлива [5–7].

Расщепление воды дает возможность легко и чисто производить газообразный водород, если можно повысить эффективность, чтобы сделать это экономически выгодным. В этом процессе поверхность полупроводника используется для разделения воды на водород и кислород посредством падающего фотона [8].

Фотокаталитическое полное расщепление H₂O считается одним из эффективных методов получения H₂ из H₂O. Если фотокаталитическая реакция будет протекать эффективно при солнечном облучении, этот метод станет привлекательным для устойчивого и крупномасштабного производства H₂ из H₂O. Поэтому было проведено большое количество исследований с целью разработки фотокатализаторов, обладающих достаточными фотокаталитическими характеристиками для полного расщепления H₂O [10–16].

BaTiO₃ – один из наиболее изученных перовскитов, известный своим квантовым параэлектрическим поведением [17] и смешанными ионно-ковалентными связями, которые создают уникальную электронную структуру и интригующие свойства для применения в микроволновой электронике [18]. Однако ис-

следования также указывают на трудности, связанные со стехиометрией, которые приводят к локально нецентросимметричной структуре, что приводит к аномальному диэлектрическому или сегнетоэлектрическому отклику [19–22]. В дополнение к структурным дефектам, на поведение титаната также влияют микроструктурные свойства, особенно при меньшем размере частиц. Соответственно, структурные и микроструктурные дефекты по-прежнему имеют ключевое значение для функциональных характеристик BaTiO₃, и дефекты следует исследовать в контексте применяемого метода синтеза.

BaTiO₃ является одним из перспективных фотокатализаторов для полного расщепления воды при облучении ближним ультрафиолетовым светом, поскольку ширина запрещенной зоны этого фотокатализатора составляет 3,2 эВ и он широко изучался благодаря своей высокой диэлектрической проницаемости, низким потерям, хорошей термостабильности и отличной фотокаталитической активности и т.д. [23–28].

ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ПОВЕРХНОСТЬ И ТЕРМОДИНАМИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ

Структурные модели

В этой работе при проведении моделирования использовалась тетрагональная фаза BaTiO₃, которая энергетически невыгодна при нулевой температуре, но существует при комнатной температуре [29].

Исходная кристаллическая структура была взята из базы данных *Materials Project* [30]. Для создания моделей поверхности (001) BaTiO₃ были использованы пластины с одиннадцатью слоями TiO₂ и BaO,

симметричными относительно плоскости зеркала. Конец одной из этих пластин имеет плоскости BaO для кристалла и представляет собой суперячейку, содержащую 108 атомов. Вторая пластина заканчивается плоскостями TiO₂, содержащими 112 атомов. Поверхность (001) была выбрана потому, что она является наиболее энергетически благоприятной как для образования TiO₂, так и для образования BaO [31]. Вакуумный слой толщиной 15 Å наносится перпендикулярно ведомым элементам, чтобы избежать искусственных взаимодействий между пластиной и ее периодическими изображениями. Все расчеты были выполнены с использованием компьютерного кода плоской волны *ab initio* VASP [32, 33], использующего формализм плоских волн в сочетании с методом проецированных волн (PAW) [34]. Геометрическая оптимизация исследуемых моделей и расчеты термодинамики реакции расщепления воды были выполнены с использованием обменно-корреляционного функционала GGA-PBE (Пердью-Берка-Эрнцера) [35]. Термодинамические поправки на эффект сольватации были рассчитаны с использованием VASPsol [36], что позволило учесть смачивание поверхности в рамках континуальной модели воды и дифференцировать сухие и влажные условия. В случаях применения континуальной модели условия рассматривались как влажные. Распределение заряда на ионах было проанализировано с использованием топологического метода Бадера [37]. Все расчеты выполнялись с учётом спиновой поляризации, за исключением случаев чистых недопированных слоёв. Установлено, что учет спин-поляризованных электронных структур является существенным, поскольку адсорбированные частицы обладают спиновым моментом [38].

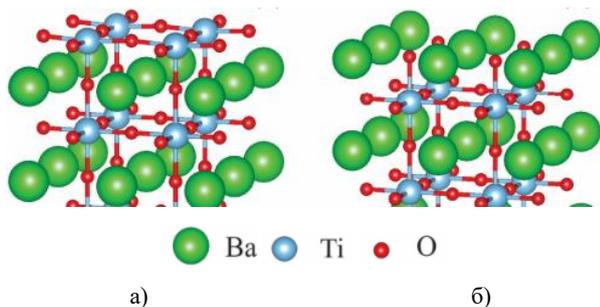
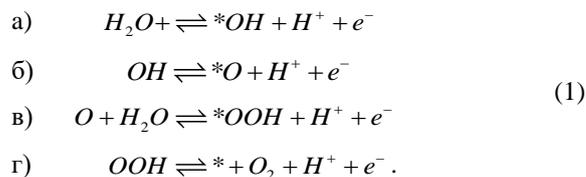


Рисунок 1. Поверхности тетрагонального BaTiO₃, терминируемые TiO₂ (а) и BaO (001) (б)

При стандартных условиях ($T = 298 \text{ K}$, $p = 1 \text{ бар}$, $pH = 0$) идеальный термодинамический потенциал для окисления воды с образованием кислорода ($H_2O \rightarrow 1/2 O_2 + 4H^+ + 4e^-$) составляет 1,23 В. На практике для этой реакции требуется потенциал выше 1,23 В. Для гетерогенных катализаторов этот дополнительный потенциал называется избыточным потенциалом η . Каталитическая реакция выделения кислорода (OER) посредством окисления воды подразделяется

на четыре основные стадии, каждая из которых включает в себя обмен электрон-протонной парой (где * обозначает место адсорбции катализатора) [39, 40]:



Используя обычный (вычислительный) подход к водородному электроду, свободная энергия ΔG реакции переноса заряда $H^* \rightleftharpoons * + H^+ + e^-$ при стандартных условиях окружающей среды равна ΔG реакции $H^* \rightleftharpoons * + 1/2 H_2$. Свободные энергии Гиббса реакции на отдельных стадиях переноса заряда, ΔG_1 , ΔG_2 , ΔG_3 и ΔG_4 , уравнения (1), зависят от энергий адсорбции OH^* , O^* и OOH^* и включают энергию нулевой точки (ZPE) и поправки на энтропию:

$$\Delta G_i = \Delta E_i - T\Delta S_i + \Delta ZPE_i - eU, \quad (2)$$

где U – потенциал, измеренный на обычном водородном электроде при стандартных условиях. Энтропийный вклад в стандартных условиях взят из справочника CRC [41]. Разности энергий ΔE_i , рассчитанные относительно H_2O и H_2 (при $U = 0$ и $pH = 0$), приблизительно равны

$$\begin{aligned} \Delta E_{OH} &= E(OH^*) - E(*) - \left[E(H_2O) - \frac{1}{2} E(H_2) \right] \\ \Delta E_O &= E(O^*) - E(*) - \left[E(H_2O) - E(H_2) \right] \\ \Delta E_{OOH} &= E(OOH^*) - E(*) - \left[2E(H_2O) - \frac{3}{2} E(H_2) \right] \end{aligned} \quad (3)$$

Тогда теоретический избыточный потенциал легко определяется как:

$$\eta = \max[\Delta G_i] / e - 1,23(V) \quad (4)$$

Избыточный потенциал, представленный в уравнении (4), является просто термодинамической величиной. Из-за отсутствия барьеров активации экспериментально определенные значения избыточного потенциала нельзя напрямую сравнить с теоретическими. Кроме того, эксперименты обычно проводятся с использованием электродов, содержащих наночастицы используемого материала, точную величину активной поверхности которых определить трудно.

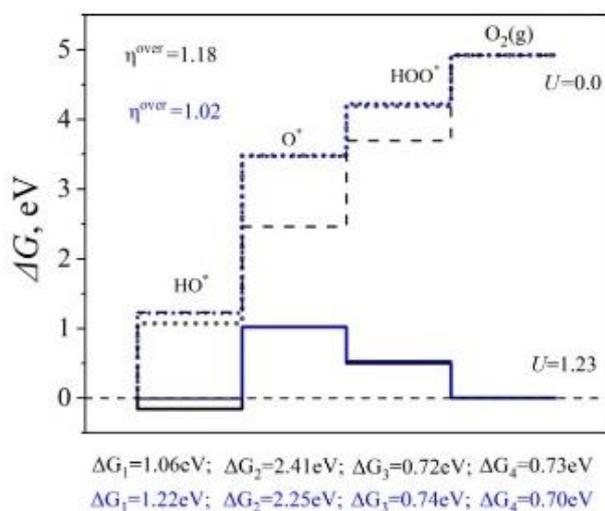
РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Реакция выделения кислорода (OER) из исходного и модифицированного Rh BaTiO₃

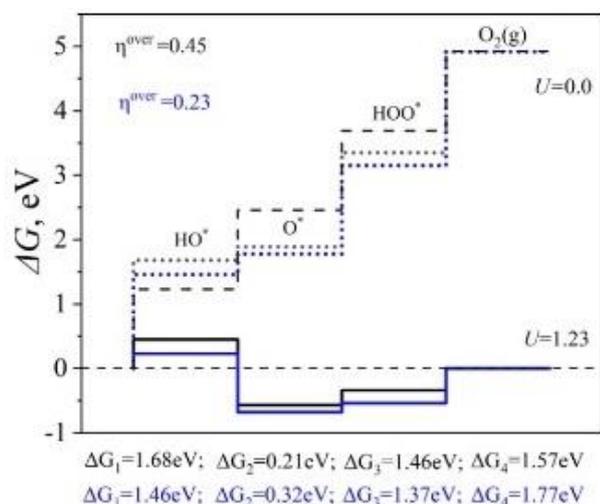
В наших предыдущих исследованиях [31] показано, что допирование Rh значительно улучшает способность BaTiO₃ поглощать солнечный свет в видимом диапазоне. Поверхность, терминируемая TiO₂, также более стабильна в отношении изменения $Ti^{4+} \rightarrow Rh^{4+}$, в то время как положение ионов Rh^{3+} на поверхности, терминируемой Ba, менее стабильно.

Ранее было показано, что поверхность, терминированная TiO₂, стабильна в рабочих условиях. Напротив, поверхность, терминированная BaO, нестабильна в отношении растворения Ba в широком диапазоне значений pH и потенциалов [42].

На рисунке 2 показаны свободные энергии реакций окисления воды на чистой и модифицированной Rh поверхности BaTiO₃ терминированной TiO₂ при нулевом потенциале и равновесном потенциале 1,23 В в зависимости от RHE. Реакция окисления отдельной молекулы воды рассматривается как на сухой поверхности, так и с учетом влияния водной среды.



а)



б)

Рисунок 2. Стандартная диаграмма свободной энергии для реакции выделения кислорода (OER) при нулевом потенциале ($U=0$, пунктирные линии) и равновесном потенциале выделения кислорода ($U=1,23$ В, сплошные линии) при $pH=0$ и $T=298$ К для чистой поверхности (а) и для поверхности, модифицированной Rh (б)

На поверхности, терминированной TiO₂, на рисунке 2а для чистой поверхности было обнаружено перенапряжение 1,18 В при сухих условиях. Это значение близко к ранее указанному значению, рассчитанному для той же поверхности и равному 1,22 В [43]. Из-за водной среды это значение снизилось до 1,02 В. Для поверхности, модифицированной Rh, значения перенапряжения составили 0,45 В и 0,23 В для сухой и влажной допированной поверхностей соответственно (рисунок 2б), что указывает на улучшение каталитической активности при допировании Rh. Полученные значения близки к таковым для пленок NiO_x, в которых церий использовался в качестве допирующей добавки, а золото – в качестве металлического носителя [42].

Черными и синими линиями показаны данные для сухой и влажной поверхностей соответственно. Пунктирные линии соответствуют идеальному катализатору.

Поскольку эффективность фотокатализатора в процессе реакции окисления воды определяется энергиями взаимодействия промежуточных продуктов реакции с поверхностью, необходимо проанализировать степени окисления активных центров в процессе расщепления воды.

Результаты анализа Бадера и спиновых состояний активных центров на поверхности катализатора и промежуточных продуктов реакции приведены в таблице 1.

Число активных центров на поверхности также включает ближайшие соседние ионы O1 и O2, поскольку их заряды и спиновые состояния изменяются на легированной поверхности в ходе реакций, представленных уравнением (1).

В случае немодифицированной поверхности, терминированной TiO₂, зарядовое и спиновое состояния ионов катализатора незначительно изменяются во время окисления воды, как в случае сухих, так и влажных поверхностей. Активный центр иона титана всегда находится в степени окисления 4+, а его ближайшие соседи – в O²⁻ состоянии. Водная среда заметно влияет только на промежуточный продукт реакции O*, что отражается в снижении перенапряжения на этой стадии реакции. В некотором смысле, электронный ион Ti⁴⁺ является слишком жестким по своим свойствам и не может регулировать свою электронную структуру для оптимизации процесса расщепления воды. Модификация поверхности с помощью Rh решает эту проблему.

**ВЛИЯНИЕ ДОПИРОВАНИЯ Rh НА АКТИВНОСТЬ РЕАКЦИИ ВЫДЕЛЕНИЯ КИСЛОРОДА
НА ПОВЕРХНОСТЯХ BaTiO₃(001)**

Таблица 1. Поверхность, терминированная TiO₂. Рассчитаны заряды Бадера q ($|e|$) и локальные магнитные моменты (μ_B) для пустых участков Ti (нелегированная поверхность) и Rh (легированная поверхность), а также участков, занятых O, OH и OOH

Поверхность TiO ₂									
	Виды			ОН*		O*		OOH*	
		q	μ	q	μ	q	μ	q	μ
Сухой	Ti	2,15	0	2,25	0	2,10	0	2,22	0
	O1	-1,18	0	-1,15	0	-1,15	0	-1,13	0
	O2	-1,22	0	-1,24	0	-1,19	0	-1,24	0
	адсорбент	-	-	-0,49	0	-0,74	0,53	-0,31	0,14
Влажный	Ti	2,24	0	2,24	0	2,12	0	2,21	0
	O1	-1,22	0	-1,16	0	-1,19	0	-1,15	0
	O2	-1,23	0	-1,24	0	-1,22	0	-1,24	0
	адсорбент	-	-	-0,52	0	-0,91	0,48	-0,35	0,13
Поверхность TiO ₂ :Rh									
Сухой	Rh	1,51	1,59	1,77	0,85	1,73	1,04	1,64	0,73
	O1	-1,06	0,17	-1,04	0,11	-1,03	0,129	-1,02	0,13
	O2	-1,11	0,15	-1,20	0,03	-1,19	0,014	-1,18	0,01
	адсорбент	-	-	-0,37	0,86	-0,33	1,04	-0,19	0,28
Влажный	Rh	1,49	1,60	1,76	0,84	1,73	1,08	1,63	0,74
	O1	-1,08	0,17	-1,08	0,11	-1,05	0,14	-1,05	0,13
	O2	-1,10	0,15	-1,11	0,03	-1,20	0,019	-1,20	0,01
	адсорбент	-	-	-0,43	0,84	-0,46	1,08	-0,23	0,29

При замене поверхностного иона титана родием легирующая добавка также воздействует на ближайшие соседние ионы O1 и O2. Данные в таблице 1 показывают, что по мере уменьшения абсолютного значения заряда Бадера на ионах O1 и O2 у этих ионов также появляется ненулевой магнитный момент. Это указывает на перенос заряда с ионов O1 и O2 на легирующую добавку. Спиновое состояние иона Rh также показывает, что он не находится в состоянии окисления 4+, поскольку в этом последнем случае его формальный магнитный момент равен 1 μ_B в низкоспиновом состоянии ($4d^5$). Настоящие расчеты показали, что значение спинового магнитного момента Rh равно 1,59 μ_B , что означает, что Rh находится в степени окисления 3+; т.е. формальный магнитный момент равен 2 μ_B в промежуточном спиновом состоянии. Это отклонение от формального значения связано с переносом заряда от O1 и O2 к легирующему катиону. При окислении воды магнитный момент Rh составляет 1,04 (O*) и уменьшается до 0,85 (ОН*) и 0,75 (OOH*) μ_B . Это можно интерпретировать как изменение степени окисления Rh с 3+ (O*) на 4+ (ОН* и OOH*).

В результате реакции окисления воды изменяется степень окисления и спиновый магнитный момент ионов на поверхности катализатора, а вместе с ними меняются и промежуточные продукты реакции. Способность Rh и окружающих ионов на поверхности изменять свои электронные свойства приводит к более эффективному окислению воды. Влияние водной среды существенно влияет на поведение частиц ОН*, что, в свою очередь, приводит к снижению перенапряжения.

На рисунке 3 показано, как перераспределяется плотность электронного заряда между сухой поверхностью, на которой находится TiO₂, и промежуточными продуктами реакции. Перенос заряда ΔQ можно рассчитать по формуле, приведенной ниже:

$$\Delta Q = Q_{SA} - Q_S - Q_A \quad (5)$$

Здесь Q_{SA} , Q_S и Q_A представляют собой пространственные распределения плотности заряда для систем, в которых промежуточные продукты реакции адсорбируются на поверхности катализатора, открытой поверхности катализатора и адсорбированных частицах, обработанных отдельно от катализатора, соответственно. Атомы кислорода адсорбированных частиц в основном ответственны за перенос заряда. Эти результаты обобщены в таблице 1.

Мы сравнили геометрию оптимизированных нелегированных и легированных TiO₂ поверхностей катализатора с адсорбированными промежуточными продуктами реакции. В таблице 2 приведены расстояния между адсорбентами и поверхностью. Во всех случаях легирование уменьшает расстояние между адсорбентом и поверхностью катализатора, за исключением адсорбции ОН-групп. Существует значительная разница между нелегированной и легированной поверхностями в отношении ориентации адсорбированной ОН-группы. В случае адсорбции на нелегированной поверхности угол TiOH $\theta = 128^\circ$, во время как в случае легированной поверхности группа ОН направлена перпендикулярно поверхности, а RhOH $\theta = 180^\circ$.

Чтобы проиллюстрировать влияние водной среды, мы рассчитали пространственное распределение разности плотностей заряда между влажными и сухи-

ми поверхностями, терминированными TiO₂; это распределение было рассчитано следующим образом:

$$\Delta Q = Q_{\text{влажный}} - Q_{\text{сухой}} \quad (6)$$

Рисунок 3 иллюстрирует полученные результаты. Водная среда приводит к переносу электронной плотности с поверхностных ионов кислорода на ионы титана. В водной среде легированная структура испытывает снижение электронной плотности на рудии.

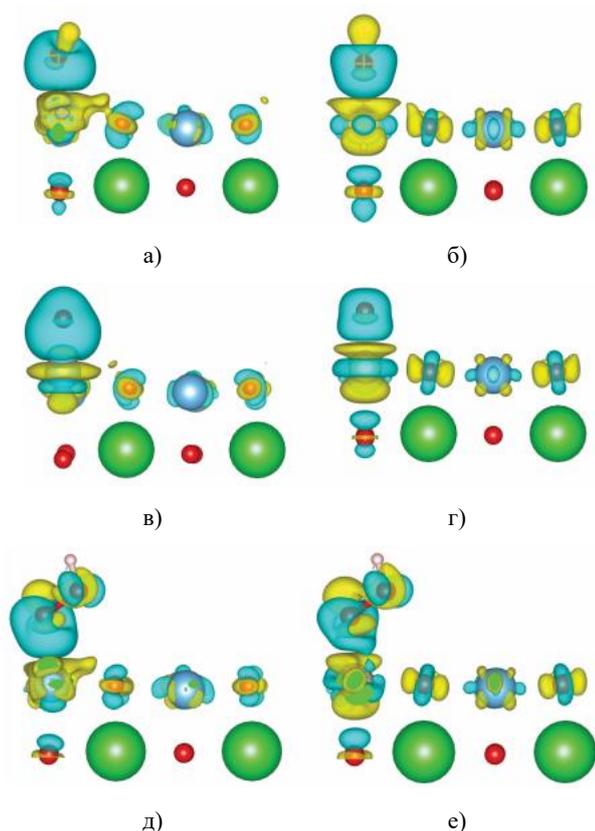


Рисунок 3. Уравнение (5) рассчитывает перенос заряда между поверхностью катализатора, на конце которой находится TiO₂, и промежуточными продуктами реакции. Представлен вид сбоку на поверхности двух верхних слоев. OH адсорбируется на недопированных (а) и допированных Rh (б) поверхностях; O адсорбируется на недопированных (в) и допированных Rh (г) поверхностях; и не адсорбируется на недопированных (д) и допированных Rh (е) поверхностях. Желтые и синие оболочки обозначают изоколоты положительных и отрицательных значений плотности электронного заряда соответственно.

Таблица 2. Расстояние (Å) между адсорбентами и поверхностями катализаторов с нелегированным и легированным терминированными TiO₂

Поверхность	Адсорбент		
	O	OH	OOH
Недopированная	1,655	1,836	2,055
Rh-допированная	1,754	1,897	1,902

Хотя прогнозируемые значения избыточного потенциала невелики, на практике для создания электрода с такими показателями потребуется много работы. Здесь мы рассмотрим идеальный случай допирования, при котором все ионы Rh расположены на поверхности BaTiO₃ при допировании 1,8%. На практике значительная часть допирующихся атомов будет располагаться внутри наночастиц. Когда степень допирования повышается для увеличения концентрации поверхностных ионов Rh, образуется гексагональная фаза BaTiO₃ [43]. Каталитические свойства гексагональной фазы все еще нуждаются в изучении.

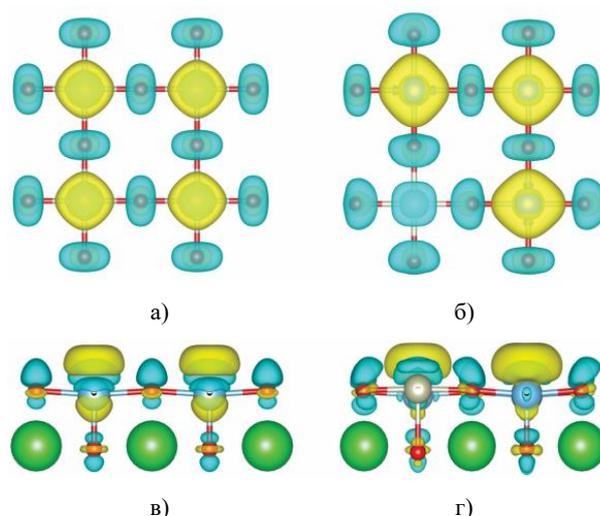


Рисунок 4. Уравнение (6) рассчитывает перенос заряда между влажной и сухой поверхностями катализатора, терминированными TiO₂. Вид сверху на верхний слой недopированной (а) и допированной Rh (б) поверхностей; вид сбоку на два верхних слоя недopированной (в) и допированной Rh (г) поверхностей. Желтые и синие оболочки обозначают изоколоты положительных и отрицательных значений плотности заряда электронов соответственно.

Оптимизация активности катализатора зависит от открытия катализатора со значительно большей площадью поверхности и более высокой концентрацией атомов допирующей примеси. Все это очень важно для обеспечения максимально эффективной работы тетрагональной фазы BaTiO₃, допированной Rh.

Результаты показывают, что при добавлении 8 мол.% Rh 85% тетрагональной фазы BaTiO₃ преобразуется в гексагональную структуру. При синтезе кристаллов BaTiO₃ с содержанием относительной влажности ниже указанного уровня возникает необходимость в измельчении кристаллов. Этот процесс увеличивает площадь рабочей поверхности катализатора, тем самым повышая вероятность обнаружения атомов Rh на поверхности полученных наночастиц. Следуя результатам данного исследования, мы можем получить наиболее эффективный катализатор на основе BaTiO₃, допированного Rh.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Используя расчеты DFT, мы показали, как изменяется свободная энергия Гиббса вдоль OER на чистых поверхностях и поверхностях, допированных Rh (001) BaTiO₃. При изменении степени окисления руды с 3+ на 4+ в процессе расщепления воды и адсорбции промежуточных продуктов поверхностные ионы кислорода приобретают заряд с поверхности, что, в свою очередь, увеличивает энергию связи между поверхностными ионами и адсорбатами. Это уменьшает энергию связи между ионами адсорбата, что приводит к уменьшению избыточного потенциала. Избыточный потенциал поверхности, Rh допированной TiO₂, значительно снижается по сравнению с нелегированной поверхностью. Ожидается, что из-за значительного избыточного потенциала эффективность OER на недопированной поверхности BaTiO₃ будет низкой, и, таким образом, допирование Rh эффективно увеличивает ее. Это означает, что BaTiO₃, легированный Rh, активен при электрохимическом окислении воды, что полностью согласуется с экспериментальными наблюдениями и предыдущими исследованиями [23].

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан, грант AP23489103 «Разработка гибридных перовскитных наноструктур для фотогенерации водорода».

ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES

- Fujishima, A., & Honda, K. Electrochemical photolysis of water at a semiconductor electrode // *Nature*. – 1972. – Vol. 238(5358). – P. 37–38.
- Chen, X., & Mao, S. S. Titanium dioxide nanomaterials: Synthesis, properties, modifications, and applications // *Chemical Reviews*. – 2007. – Vol. 107(7). – P. 2891–2959.
- Grätzel, M. Photoelectrochemical cells // *Nature*. – 2001. – Vol. 414(6861). – P. 338–344.
- Kudo, A., & Miseki, Y. Heterogeneous photocatalyst materials for water splitting // *Chemical Society Reviews*. – 2009. – Vol. 38(1). – P. 253–278.
- Singh, D. P., & Zhao, H. Ferroelectric photocatalysis: The influence of polarization on surface chemical reactions // *Nano Energy*. – 2018. – Vol. 53. – P. 550–561.
- Chen, D., Cheng, Y. B., & Caruso, R. A. Surface modification of BaTiO₃ nanoparticles and their application in dye-sensitized solar cells // *Advanced Functional Materials*. – 2010. – Vol. 20(2). – P. 339–345.
- Lin, X., & Wang, X. BaTiO₃ nanostructures: Controlled synthesis and applications in photocatalysis // *Materials Chemistry and Physics*. – 2017. – Vol. 198. – P. 168–176.
- Zhang, Y., & Tang, Z. Advances in BaTiO₃-based photocatalysts for solar-driven water splitting // *Journal of Materials Science*. – 2019. – Vol. 54(12). – P. 9408–9424.
- Liu, H., & Zhang, W. (2021). Interface engineering of BaTiO₃ nanoparticles for enhanced photocatalytic performance // *Applied Catalysis B: Environmental*. – 2021. – Vol. 298, 120580.
- Kim, T. H., & Park, J. Enhanced charge separation in BaTiO₃ nanostructures through surface modification: A route to high-efficiency photocatalysis // *Nano Energy*. – 2020. – Vol. 77. – P. 105266.
- Y.M. Rangel-Hernandez, J. C. Rendón Angeles, Z. Matamoros-Veloza, Kazumichi Yanagisawa. One-step synthesis of fine SrTiO₃ particles using SrSO₄ ore under alkaline hydrothermal conditions // *Chemical Engineering Journal*. – 2009. – Vol. 155(s 1–2). – P. 483–492. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2009.07.024>
- Vittorio Berbenni, Amedeo Marini, Giovanna Bruni. Effect of Mechanical Activation on the Preparation of SrTiO₃ and Sr₂TiO₄ Ceramics from the Solid State Systems SrCO₃-TiO₂ // *Journal of Alloys and Compounds*. – 2001. – Vol. 329(s 1–2). – P. 230–238. [https://doi.org/10.1016/S0925-8388\(01\)01574-2](https://doi.org/10.1016/S0925-8388(01)01574-2)
- Xiaohua Liu, Haixin Bai. Liquid–solid reaction synthesis of SrTiO₃ submicron-sized particles // *Materials Chemistry and Physics*. – 2011. – Vol. 127(s 1–2). – P. 21–23. <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2011.01.056>
- Shuang Zhi Liu, Tian Xi Wang, Li Yun Yang. Low temperature preparation of nanocrystalline SrTiO₃ and BaTiO₃ from alkaline earth nitrates and TiO₂ nanocrystals // *Powder Technology*. – 2011. – Vol. 212(2). – P. 378–381. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2011.06.010>
- Tao Xian, Hwami Yang, J.-F. Dai, W.-J. Feng. Photocatalytic properties of SrTiO₃ nanoparticles prepared by a polyacrylamide gel route // *Materials Letters*. – 2011. – Vol. 65(21). – P. 3254–3257. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2011.07.019>
- Qi-An Zhu, Jun-Gu Xu, S. Xiang, Zhi-Gang Tan. Preparation of SrTiO₃ nanoparticles by the combination of solid phase grinding and low temperature calcining. March 2011. *Materials Letters* 65(5):873-875. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2011.07.019>
- Thanawat Klaytae, Phiram Panthong. Preparation of nanocrystalline SrTiO₃ powder by sol–gel combustion method // *Ceramics International*. – 2013. – Vol. 39. – P.405–408. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2012.10.103>
- Kuang Q, Yang S. Template synthesis of single-crystal-like porous SrTiO₃ nanocube assemblies and their enhanced photocatalytic hydrogen evolution // *ACS Appl Mater Interfaces*. – 2013. – Vol. 5. – P. 3683–3690.
- Xu X, Lv M, Sun X, et al. Role of surface composition upon the photocatalytic hydrogen production of Cr-doped and La/Cr-codoped SrTiO₃ // *J Mater Sci*. – 2016. – Vol. 51. – P. 6464–6473.
- Ali S, Granbohm H, Ge Y, et al. Crystal structure and photocatalytic properties of titanate nanotubes prepared by chemical processing and subsequent annealing // *J Mater Sci*. – 2016. – Vol. 51. – P. 7322–7335.
- Nageri, M.; Kumar, V. Manganese-doped BaTiO₃ nanotube arrays for enhanced visible light photocatalytic applications // *Mater. Chem. Phys*. – 2018. – Vol. 213. – P. 400–405. <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2018.04.003>
- Demircivi, P.; Simsek, E.B. Visible-light-enhanced photoactivity of perovskite-type W-doped BaTiO₃ photocatalyst for photodegradation of tetracycline // *J. Alloys Compd*. – 2019. – Vol. 774. – P. 795–802. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2018.09.354>
- Artrith, N.; Sailuam, W.; Limpijumnong, S.; Kolpak, A.M. Reduced overpotentials for electrocatalytic water splitting over Fe- and Ni-modified BaTiO₃ // *Phys*.

- Chem. Chem. Phys. – 2016. – Vol. 18. – P. 29561–29570. <https://doi.org/10.1039/C6CP06031E>;
<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/27748475>
24. Xie, P.; Yang, F.; Li, R.; Ai, C.; Lin, C.; Lin, S. Improving hydrogen evolution activity of perovskite BaTiO₃ with Mo doping: Experiments and first-principles analysis // *Int. J. Hydrogen Energy*. – 2019. – Vol. 44. – P. 11695–11704. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.03.145>
25. Tanwar, N.; Upadhyay, S.; Priya, R.; Pundir, S.; Sharma, P.; Pandey, O. Eu-doped BaTiO₃ perovskite as an efficient electrocatalyst for oxygen evolution reaction // *J. Solid State Chem*. – 2023. – Vol. 317. – P. 123674. <https://doi.org/10.1016/j.jssc.2022.123674>
26. Maeda, K. Rhodium-doped barium titanate perovskite as a stable p-type semiconductor photocatalyst for hydrogen evolution under visible light // *ACS Appl. Mater. Interfaces*. – 2014. – Vol. 6. – P. 2167–2173. <https://doi.org/10.1021/am405293e>;
<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/24410048>
27. Konta, R.; Ishii, T.; Kato, H.; Kudo, A. Photocatalytic activities of noble metal ion doped SrTiO₃ under visible light irradiation // *J. Phys. Chem. B*. – 2004. – Vol. 108. – P. 8992–8995. <https://doi.org/10.1021/jp049556p>
28. Nishioka, S.; Maeda, K. Hydrothermal synthesis of rhodium-doped barium titanate nanocrystals for enhanced photocatalytic hydrogen evolution under visible light // *RSC Adv*. – 2015. – Vol. 5. – P. 100123–100128. <https://doi.org/10.1039/C5RA20044J>
29. Закиева Ж.Е., Инербаев Т.М., Абуова А.У., Абуова Ф.У., Мерали Н.А., Толеген У. Ж., Каптагай Г.А.. Ab-Initio расчеты родий допированной (001) поверхности ромбоэдрической фазы BaTiO₃ // *Вестник НЯЦ РК*. – 2024. – Вып. 2. – С. 104–109. [Zakiyeva Zh.Ye., Inerbaev T.M., Abuova A.U., Abuova F.U., Merali N.A., Tolegen U.Zh., Kaptagay G.A. Ab-Initio calculations of the rhodium-doped (001) surface of the rhombohedral phase BaTiO₃ // *NNC RK Bulletin*. – 2024. – Vol. 2. – P. 104–109. (In Russ.) <https://doi.org/10.52676/1729-7885-2024-2-104-109>]
30. Inerbaev T.M., Zakiyeva Zh.Ye., F.U., Abuova A.U., Nurkenov S.A., Kaptagay G.A. DFT studies of BaTiO₃ // *Вестник Карагандинского университета*. – 2023. P. 72–78].
31. Закиева Ж.Е., Инербаев Т.М., Абуова А.У., Абуова Ф.У., Нуркенов С.А., Каптагай Г.А., Кабдрахимова Г.Д. Влияние допирования Rh на оптическое поглощение поверхности (001) BaTiO₃ // *Вестник НЯЦ РК*. – 2024. – Вып. 2. – С. 185–191. [Zakiyeva Z.Ye., Inerbaev T.M., Abuova A.U., Abuova F.U., Nurkenov S.A., Kaptagay G.A., Kabdrakhimova G.D. Effect of Rh-doping on the optical absorption of the (001) BaTiO₃ surface // *NNC RK Bulletin*. – 2024. – Vol. 2. – P. 185–191. (In Russ.) <https://doi.org/10.52676/1729-7885-2024-2-185-191>]
32. Kresse G., Joubert D. From ultrasoft pseudopotentials to the projector augmented-wave method // *Physical Review B*. – 1999. – Vol. 59. – No. 3. – P. 1758. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.59.1758>
33. Kresse G., Furthmüller J. Efficient iterative schemes for ab initio total-energy calculations using a plane-wave basis set // *Physical Review B*. – 1996. – Vol. 54. – No. 16. – P. 11169. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.54.11169>
34. Blöchl P. E. Projector augmented-wave method // *Physical Review B*. – 1994. – Vol. 50. – No. 24. – P. 17953. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.50.17953>
35. Perdew J. P., Burke K., Ernzerhof M. Generalized gradient approximation made simple // *Physical Review Letters*. – 1996. – Vol. 77. – No. 18. – P. 3865. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.77.3865>
36. Mathew, K.; Sundararaman, R.; Leitchworth-Weaver, K.; Arias, T.A.; Hennig, R.G. Implicit solvation model for density-functional study of nanocrystal surfaces and reaction pathways // *J. Chem. Phys*. – 2014. – Vol. 140. – P. 084106. <https://doi.org/10.1063/1.4865107>
37. Bader, R.F.W. *Atoms in Molecules. A Quantum Theory*. – Oxford University Press, Oxford, UK. – 1990.
38. Mom, R.V.; Cheng, J.; Koper, M.T.M.; Sprik, M. Modeling the Oxygen Evolution Reaction on Metal Oxides: The Influence of Unrestricted DFT Calculations // *J. Phys. Chem. C*. – 2014. – Vol. 118. – P. 4095–4102.
39. Haynes, W.M. *CRCHandbook of Chemistry and Physics*, 93rd ed. – CRC Press: Boca Raton, FL, USA. – 2012.
40. Man, I.C., et al., Universality in oxygen evolution electrocatalysis on oxide surfaces // *ChemCatChem*. – 2011. – Vol. 3(7). – P. 1159–1165.
41. García-Mota, M., et al., Importance of correlation in determining electrocatalytic oxygen evolution activity on cobalt oxides // *The Journal of Physical Chemistry C*. – 2012. – Vol. 116(39). – P. 21077–21082.
42. Shi, K.; Zhang, B.; Liu, K.; Zhang, J.; Ma, G. Rhodium-Doped Barium Titanate Perovskite as a Stable p-Type Photocathode in Solar Water Splitting // *ACS Appl. Mater. Interfaces*. – 2023. – Vol. 15. – P. 47754–47763. <https://doi.org/10.1021/acsami.3c09635>;
<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/37769117>
43. Ng, J.W.D.; García-Melchor, M.; Bajdich, M.; Chakhranont, P.; Kirk, C.; Vojvodic, A.; Jaramillo, T.F. Gold-supported cerium-doped NiOx catalysts for water oxidation // *Nat. Energy*. – 2016. – Vol. 1. – P. 16053. <https://doi.org/10.1038/nenergy.2016.53>

**Rh ҚОСПАСЫНЫҢ BaTiO₃(001) БЕТТЕРІНДЕГІ ОТТЕГІНІҢ БӨЛІНУ РЕАКЦИЯСЫНЫҢ
БЕЛСЕНДІЛІГІНЕ ӘСЕРІ**

**A. У. Абуова¹, У. Ж. Толеген^{1*}, Ф. У. Абуова¹, Т. М. Инербаев¹,
С. А. Нұркенов^{1,2}, Ж. Е. Зәкиева², Г. Ә. Қаптағай³**

¹ *Л. Н. Гумилев атындағы Евразия Ұлттық Университеті, Астана, Қазақстан*

² *Астана Халықаралық университет, Астана, Қазақстан*

³ *Қазақ Ұлттық қыздар педагогикалық университеті, Алматы, Қазақстан*

* Байланыс үшін E-mail: t-ulzhan@list.ru

Нанобөлшектер түріндегі фотокатализаторларды қолдана отырып, судың фотоиндукцияланған бөлінуі экологиялық таза сутекті алудың перспективалы және қарапайым тәсілі болып табылады. Бұл жұмыста біз модификацияланған барий титанатының (BaTiO₃), жердегі кең таралған прекурсорлардан алынған арзан перовскит оксидінің потенциалын зерттейміз, бірінші принциптерден есептеулерді қолдана отырып, судың тотығуының тиімді электрокатализаторларын жасаймыз.

TiO₂ терминалы бар BaTiO₃(001) беті оны катализатор ретінде пайдалану тұрғысынан перспективалы екендігі көрсетілген. Ti-ді Rh-ге ауыстырғаннан кейін легирленген ион көршілес оттегі иондарынан Электрон тығыздығының бір бөлігін қабылдай алады. Нәтижесінде, судың Тотығу реакциясы кезінде родий иондары 3+ мен 4+ арасындағы аралық тотығу күйінде болуы мүмкін. Бұл катализатор бетіндегі аралық реакция өнімдерінің адсорбция энергиясына әсер етіп, артық потенциалдың мөлшерін азайтады.

Түйін сөздер: *электрокатализ, фотокатализ, барий титанаты, жолақ ені, перовскит, электрод материалдары, судың бөлінуі.*

**EFFECT OF Rh DOPING ON THE ACTIVITY OF THE OXYGEN RELEASE REACTION
ON BaTiO₃(001) SURFACES**

**A. U. Abuova¹, U. Zh. Tolegen^{1*}, F. U. Abuova¹, T. M. Inerbaev¹,
S. A. Nurkenov^{1,2}, Zh. Ye. Zakiyeva², G. A. Kaptagay³**

¹ *L.N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, Kazakhstan*

² *Astana International University, Astana, Kazakhstan*

³ *Kazakh National Women's Pedagogical University, Almaty, Kazakhstan*

* E-mail for contacts: t-ulzhan@list.ru

Photoinduced splitting of water using photocatalysts in the form of nanoparticles is a promising and simple way to produce environmentally friendly hydrogen. In this paper, we investigate the potential of modified barium titanate (BaTiO₃), an inexpensive perovskite oxide obtained from precursors widely distributed on earth, to develop effective electrocatalysts for water oxidation using first-principles calculations.

It has been shown that the BaTiO₃(001) surface terminated with TiO₂ is more promising in terms of its use as a catalyst. After replacing Ti with Rh, the dopant ion can take over part of the electron density from neighboring oxygen ions. As a result, during the oxidation reaction of water, rhodium ions can be in an intermediate oxidation state between 3+ and 4+. This affects the adsorption energy of the reaction intermediates on the surface of the catalyst, reducing the excess potential.

Keywords: *electrocatalysis, photocatalysis, barium titanate, band gap, perovskite, electrode materials, water splitting.*

<https://doi.org/10.52676/1729-7885-2025-1-148-154>
УДК 621.352.4:66.02

DEVELOPMENT AND CREATION OF RESEARCH CELLS FOR SOLID OXIDE FUEL CELLS

S. Opakhai*, K. A. Kuterbekov, K. Zh. Bekmyrza, A. M. Kabyshev,
M. M. Kubenova, N. K. Aydarbekov, Zh. Zhumadilova

¹ L.N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, Kazakhstan

* E-mail for contacts: serikzhan.opakhai07@gmail.com

The article is devoted to the development and creation of research cells for solid oxide fuel cells (SOFCs) designed to study their characteristics at various temperatures. The primary focus is on the use of high-temperature glass sealants that ensure the hermeticity of the structure. The paper describes the materials and methods for fabricating model fuel cells, including various combinations of electrolytes (YSZ, ScSZ, GDC) and electrodes (NiO, LSM). The design of the research cells incorporates electrochemical sensors, providing precise control over the composition of the gas mixture entering the active zone, with deviations not exceeding 0.5%. The results of current-voltage characteristics of the model SOFCs in the temperature range of 700–950 °C showed that an increase in temperature leads to a reduction in ohmic losses and improved kinetics of electrochemical reactions. The maximum power density is achieved at higher current densities with increasing temperature, which is attributed to enhanced material conductivity and improved electrode activity. At lower temperatures, limited cell efficiency is observed due to increased electrolyte resistance and reduced electrode activity. The developed research cells demonstrated high reliability and reproducibility of data, enabling their use in optimizing the material composition and structure of SOFCs. The obtained results confirm the potential of the proposed methodology for the development of highly efficient fuel cells.

Keywords: *solid oxide fuel cells (SOFCs), model fuel cells, research cells, high-temperature glass sealants, electrochemical sensors, current-voltage characteristics, power density, ohmic losses, kinetics of electrochemical reactions.*

INTRODUCTION

Energy is a cornerstone of modern society. The anticipated surge in global energy consumption by 2050 necessitates prompt and decisive measures. In light of the growing depletion of natural energy resources, the development and enhancement of highly efficient electrochemical systems for energy storage and conversion have become increasingly critical. At present, hydrogen energy (or the hydrogen economy) is widely regarded as a key solution to addressing environmental, economic, and social challenges, as well as ensuring sustainable development and long-term energy security. Hydrogen energy is recognized as a priority field (a critical technology) in nearly all developed nations. However, significant challenges impede the successful commercialization of hydrogen energy technologies. A fundamental requirement for the transition to a hydrogen economy is the establishment of a hydrogen infrastructure, effective methods for hydrogen storage and transportation, and a reduction in associated costs [1, 2].

Fuel cells are advanced electrochemical systems that directly convert the chemical energy of fuels into electrical energy with high efficiency. Unlike conventional energy sources, such as internal combustion engines, fuel cells produce minimal carbon dioxide emissions and significantly reduce environmental pollution. One of the defining characteristics of fuel cells is their ability to utilize a wide range of fuels, including hydrogen, methane, and other hydrocarbons, making them adaptable for various energy and transportation applications [3–5]. Fuel cells are categorized based on the type of electrolyte they

employ, such as proton exchange membrane fuel cells (PEMFC), phosphoric acid fuel cells (PAFC), alkaline fuel cells (AFC), and solid oxide fuel cells (SOFC). Among these, SOFCs stand out due to their distinctive advantages [6, 7]. These cells operate at elevated temperatures (450–1000 °C), enabling the direct use of diverse fuels, including hydrocarbons, without requiring pre-treatment. Furthermore, SOFCs exhibit high energy conversion efficiency, extended operational life, structural adaptability, and low greenhouse gas emissions [8, 9].

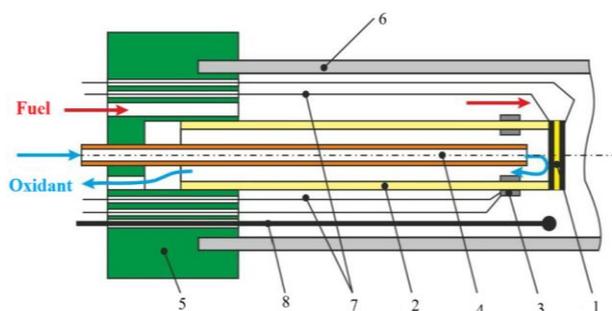
The working mechanism of SOFCs relies on the electrochemical conversion of fuel facilitated by a solid oxide electrolyte that conducts oxygen ions. The cell comprises three main components: the anode, cathode, and electrolyte. The anode functions as the oxidation electrode, the cathode as the reduction electrode, and the electrolyte facilitates oxygen ion transfer from the cathode to the anode. The electrochemical reactions occurring at the anode and cathode generate electrons, which flow through an external circuit, producing an electric current. These processes position SOFCs as a promising energy solution for both stationary and mobile applications [10–12].

This article aims to develop the design and fabrication techniques for experimental SOFCs, including model elements utilizing various material combinations. It also seeks to perform a comprehensive analysis of their voltage-current characteristics across a broad temperature spectrum. The research emphasizes optimizing material compositions and SOFC structures to improve their efficiency, power density, and operational reliability. Additionally, it focuses on creating reliable electrochemical

sensors for precise monitoring of the gas atmosphere in the operating zone.

MATERIALS AND METHODS

Figure 1 shows a schematic representation of the design of the research cell. The main components of the cell include the holder (5), the tailpiece (2), and the model SOFC (1). In addition to these elements, the research cell contains another crucial component — the electrochemical sensor (3), which allows for monitoring the composition of the fuel mixture at the cell inlet.



1 – model SOFC; 2 – tail (ceramic tube); 3 – electrochemical sensor; 4 – gas inlet; 5 – sealed holder with gas and current inlets (leads); 6 – furnace chamber (ceramic tube); 7 – probe wire leads; 8 – control thermocouple

Figure 1. Research cell diagram

In the design shown in Figure 1, one end of the tailpiece (2) is hermetically connected to the holder (5), while the opposite end houses the disc-shaped model SOFC (1). The hermetic attachment of the model SOFC to the tailpiece is achieved using high-temperature glass sealants, which must exhibit good wettability and a coefficient of thermal expansion (CTE) closely matching that of the SOFC components. The design of the holder (5) includes spatially separated openings for gas flow and electrical connections, as well as provisions for mounting the tailpiece and a seat for the centered and hermetic installation of the cell into the tubular furnace chamber (6). The length of the thermal compensation tailpiece (2), combined with the length of the ceramic tube of the furnace (6), is selected based on the following conditions: heat dissipation at the end (near the holder), the extent of the thermal zone of the furnace (with the sample positioned in the middle), and ensuring the required temperature gradient.

Manufacturing of Research Cells

Source materials

The following powders were used to fabricate model fuel cells (hereinafter referred to as cells): YSZ, ScSZ, GDC, NiO, and LSM, the characteristics of which are presented in Table 1. The YSZ and ScSZ electrolyte powders were synthesized using the laser evaporation method [13], while the NiO powder was produced by the wire explosion method [14]. The GDC powder is a commercial product from Kceracell Co., Ltd. The LSM powder was synthesized through the pyrolysis of a polymer-salt composition.

Table 1. Nomenclature and characteristics of the original powders

Designation	Compound	S_{BET} , m^2/g	d_{BET} , nm	γ_{theor} , g/cm^3
YSZ	$Zr_{0,84}Y_{0,16}O_{2-5}$	4,7	216	5,92
ScSZ	$Zr_{0,8}Sc_{0,2}O_{2-5}$	52	20	5,67
GDC	$Ce_{0,9}Gd_{0,1}O_{2-5}$	34,2	24,3	7,21
NiO	NiO	28,4	31	6,80
LSM	$La_{0,7}Sr_{0,3}MnO_{3-5}$	0,79	1200	6,51

Manufacturing of elements

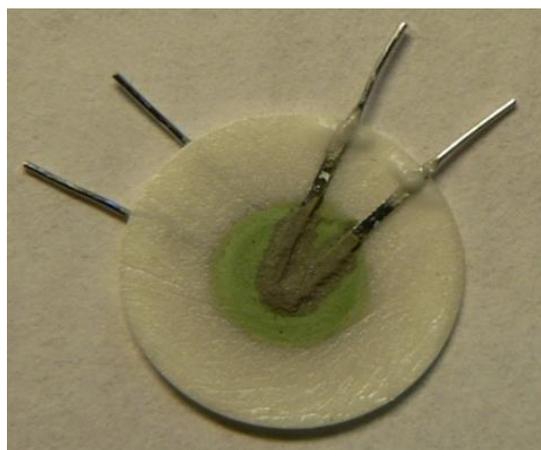
The fabricated planar model cells had different structures (supporting components, electrolyte, and electrode compositions). A description of the cells is provided in Table 2.

Table 2. Structure of model elements

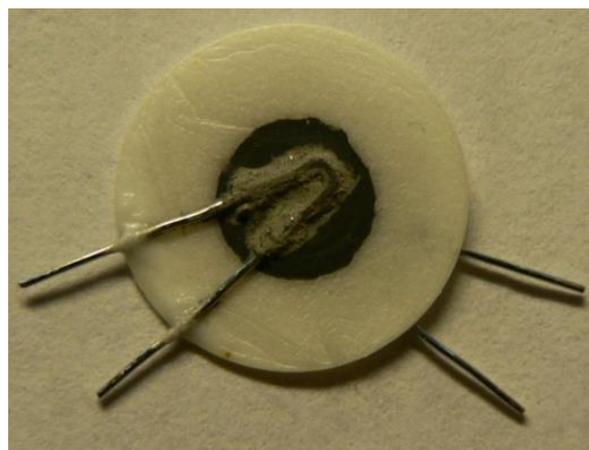
Cell	Supporting component	Cathode, (mass%)	Electrolyte	Anode (mass%)
No 1	Electrolyte	60LSM+40YSZ	YSZ	50Ni+50YSZ
No 2	Electrolyte	60LSM+40YSZ	YSZ	50Ni+50GDC
No 3	Electrolyte	60LSM+40YSZ	ScSZ	50Ni+50YSZ
No 4	Cathode	50LSM+50YSZ	YSZ	50Ni+50GDC
No 5	Anode	60LSM+40YSZ	YSZ	50Ni+50GDC

Supporting electrolyte samples in the form of discs were fabricated from films of the corresponding electrolyte material using uniaxial pressing. The film composition included 84.6 wt.% powder, 12 wt.% polyvinyl butyral (PVB), and 3.4 wt.% triethylene glycol dimethyl ether (TEGDME). The pressed samples were sintered at 1350 °C for 5 hours. The resulting discs had a diameter of approximately 11 mm, a thickness of 300 μm , and a density exceeding 97% of the theoretical value. Electrode slurries with the following composition were applied to the supporting electrolyte samples using the painting method: 87.2 wt.% powder mixture, 10 wt.% PVB, and 2.8 wt.% TEGDME. Isopropyl alcohol served as the solvent. The electrodes were sintered in an air atmosphere at 1200 °C for 4 hours. The electrode thickness after sintering was approximately 30 μm . It should be noted that fibers from ashless filter paper (5 wt.%) were used as pore formers during the fabrication of both the supporting anode and the supporting cathode. Platinum wire with a diameter of 0.3 mm was used as probes (current collectors) for all cells. To improve electrical contact, the probes were coated with platinum paste, which was sintered at 1000 °C. Figure 2 shows the cells with the supporting electrolyte.

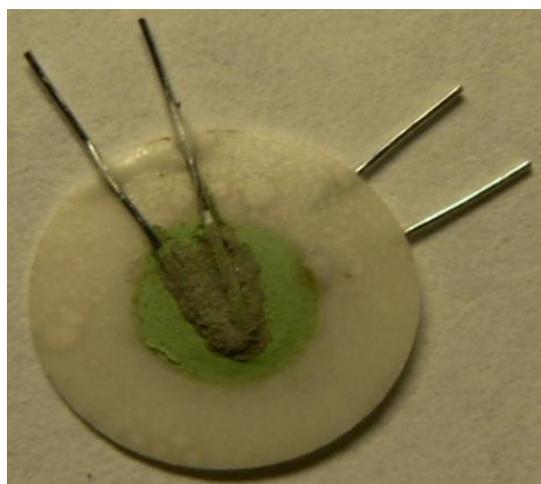
The cathodes and anodes of all cells were impregnated (activated) three times with solutions of $Pr(NO_3)_3$ and $Ce(NO_3)_3$, respectively. The prepared cells were hermetically attached to the end of a tubular stem made of industrial YSZ ceramics using SG2 glass sealant. Figure 3 shows the appearance of the fully assembled Cell No. 1. The only difference between Cell No. 1 and the other cells is the model fuel cell.



a)



b)

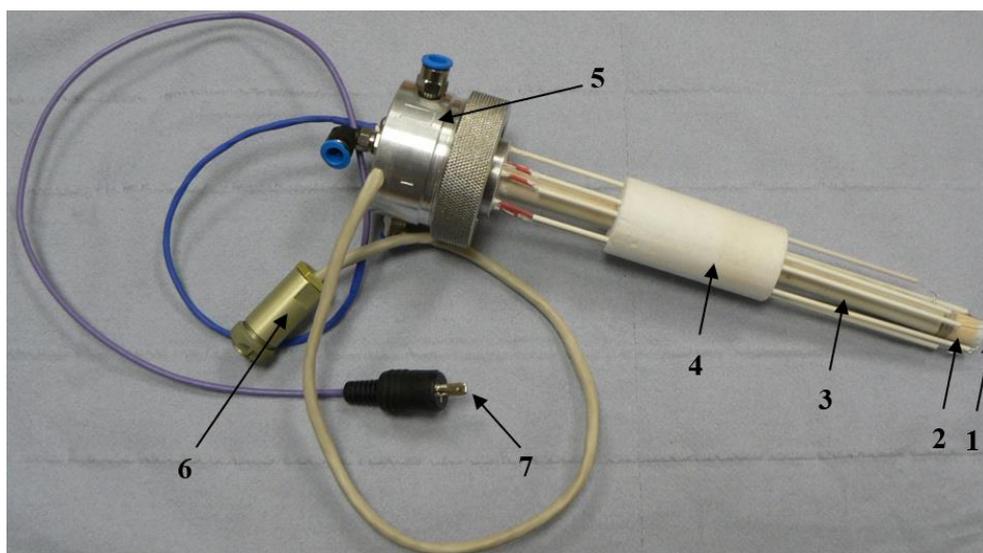


c)

Figure 2. Appearance of planar cells for: Cell No. 1 (a), Cell No. 2 (b) and Cell No. 3 (c)

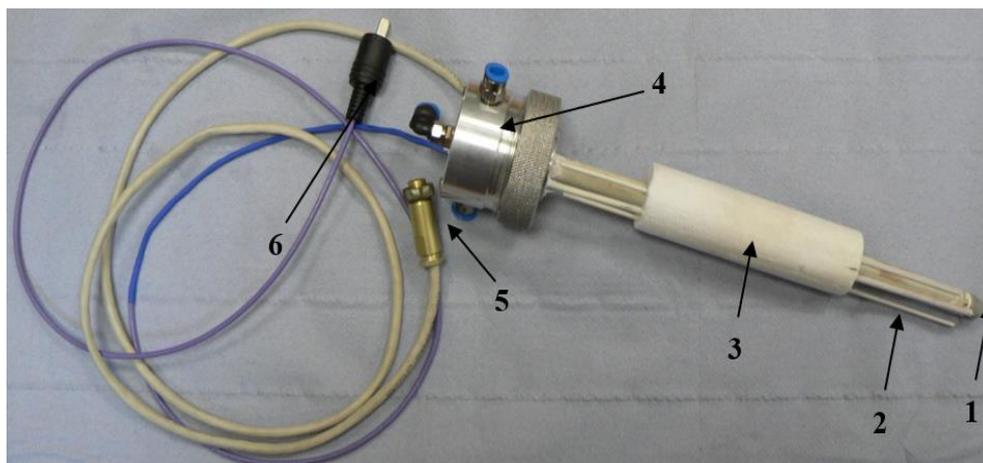
Manufacturing of the Sensor

It was proposed to simplify the terminology by referring to the electrochemical sensor, manufactured as a separate device and installed in a tubular furnace opposite the end where the research cell is mounted, simply as a “sensor”. The working part of the sensor was made from an industrially produced YSZ test tube. Platinum electrodes were applied to the inner and outer surfaces of the test tube using the painting method and sintered at 1200 °C. Platinum wire with a diameter of 0.3 mm served as probes. In other aspects, the design of the sensor does not differ from the design of the research cell. The working part of the sensor was attached to the end of the tubular stem using SG3 glass sealant. The appearance of the sensor is shown in Figure 4.



1 – model fuel cell; 2 – electrochemical sensor; 3 – tail; 4 – thermal insulation; 5 – cell holder; 6 – probe terminals; 7 – terminals of the control thermocouple

Figure 3. Appearance of research cell No. 1



1 – electrochemical sensor; 2 – tail; 3 – thermal insulation; 4 – sensor holder; 5 – probe terminals; 6 – terminals of the control thermocouple

Figure 4. Appearance of the Sensor

RESULTS AND DISCUSSIONS

Characteristics of Research Cells

Electrochemical sensor readings

Table 3 presents the test results of the electrochemical sensors for all research cells and the sensor at various temperatures. Measurements were conducted under identical gas flow conditions: hydrogen – 100 ml/min, air – 100 ml/min.

Table 3. Readings of electrochemical sensors of research cells and the sensor

T, °C	C1, B	C2, B	C3, B	C4, B	C5, B	Sensor, B
900	1.100	1.101	1.106	1.103	1.102	1.091
850	1.109	1.112	1.116	1.111	1.110	1.100
800	1.119	1.122	1.125	1.122	1.119	1.109
750	1.127	1.131	1.135	1.129	1.124	1.117
700	1.134	1.135	1.141	1.133	1.130	1.124

It is evident that the data variation for all electrochemical sensors does not exceed 0.5%. Thus, the fabricated electrochemical sensors enable highly accurate monitoring of the gas atmosphere in the working zone and, consequently, allow for effective control of the hermeticity of the research cells.

Characteristics of model fuel cells

Figure 5 shows graphs of the dependence of voltage (E) and power density (W) on current density (J) for model fuel cells at various temperatures (700 °C, 750 °C, 800 °C, 850 °C, 900 °C, and 950 °C).

The voltage decreases linearly with increasing current density for all temperatures. This is due to the growth of ohmic losses and polarization caused by the increase in the rate of electrochemical reactions. Higher temperatures (e.g., 900 °C and 950 °C) show slightly higher initial voltage compared to lower temperatures (700 °C and 750 °C), which is attributed to the reduction in the internal resistance of the cell. Power density increases with current density until it reaches a maximum, after which it begins to decrease due to a sharp drop in voltage. At higher temperatures, the maximum power density is higher, reflecting improved electrochemical reaction kinetics and increased material conductivity. At lower temperatures, the initial voltage is lower than at higher temperatures, and the maximum power density is reached at a lower current density (approximately 0.4–0.5 A/cm²). This lower performance is explained by increased electrolyte resistance and reduced electrode activity. At intermediate temperatures, there is a balance between good electrolyte conductivity and sufficient reaction kinetics. The maximum power density is achieved at a higher current density (approximately 0.5–0.6 A/cm²) compared to 700 °C and 750 °C. Higher temperatures demonstrate better performance: voltage drops more slowly with increasing current density, and the power density reaches its maximum at even higher current densities (0.6–0.7 A/cm²). This is due to minimal ohmic losses and high activity of cathodic and anodic reactions.

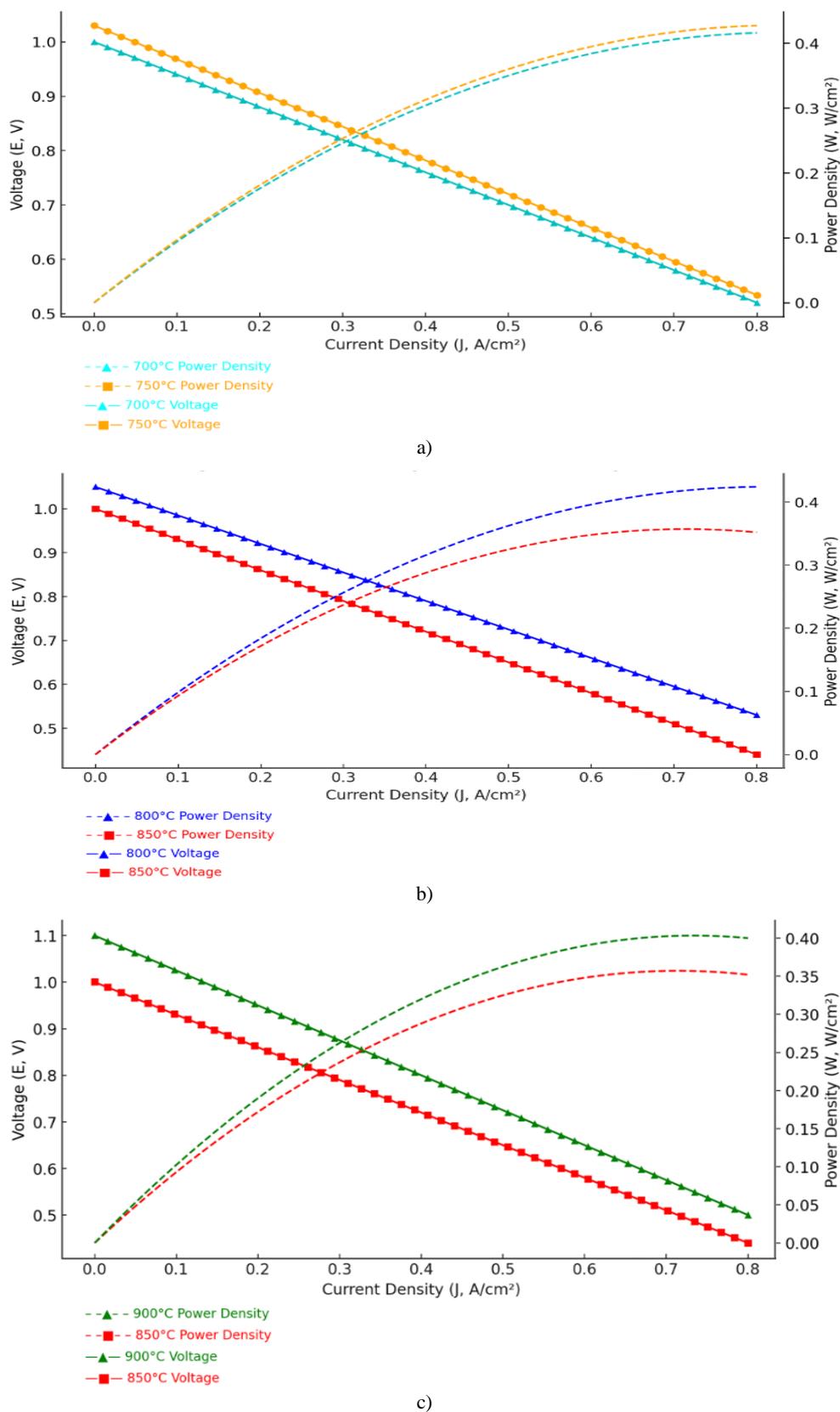


Figure 5. Volt-Ampere characteristics of the cell taken at: 700 and 750 °C (a), 800 and 850 °C (b), 900 and 950 °C (c)

CONCLUSIONS

Research cells for solid oxide fuel cells (SOFCs) were developed and fabricated using high-temperature glass sealants to ensure the hermeticity of the structure. The cell design includes electrochemical sensors that demonstrated high accuracy in measuring the gas atmosphere in the working zone, with deviations not exceeding 0.5%. This allows for effective control of experimental conditions and cell hermeticity. The results of the voltage-current characteristics of the model SOFCs revealed a linear decrease in voltage with increasing current density, attributed to growing ohmic losses and polarization. It was found that increasing the temperature (up to 950 °C) reduces the internal resistance of the cells, enhances the kinetics of electrochemical reactions, and improves material conductivity, resulting in higher power density. The maximum power density is achieved at higher current densities with increasing temperature, indicating improved performance. At lower temperatures, limited electrode activity and increased electrolyte resistance were observed, reducing the efficiency of the cells. Thus, the developed research cells and their fabrication methodology enable the study of SOFC characteristics over a wide temperature range, ensuring high data reproducibility and applicability for optimizing material composition and cell structure.

Acknowledgements

The work was fulfilled in the framework of targeted financing program no.BR21882359, supported by the Ministry of Science and Higher Education of Kazakhstan.

REFERENCES

1. Le T.T., Sharma P., Bora B.J., Tran V.D., Truong T.H., Le H.C., Nguyen P.Q.P. Fueling the future: A comprehensive review of hydrogen energy systems and their challenges // *International Journal of Hydrogen Energy*. – 2024. – Vol. 54. – P. 791–816. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2024.01.012>
2. Evro S., Oni B.A., Tomomewo O.S. Carbon neutrality and hydrogen energy systems // *International Journal of Hydrogen Energy*. – 2024. – Vol. 78. – P. 1449–1467. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2023.12.045>
3. Fan L., Tu Z., Chan S.H. Recent development of hydrogen and fuel cell technologies: A review // *Energy Reports*. – 2021. – Vol. 7. – P. 8421–8446. <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2021.08.033>
4. Aminudin M.A., Kamarudin S.K., Lim B.H., Majilan E.H., Masdar M.S., Shaari N. An overview: Current progress on hydrogen fuel cell vehicles // *International Journal of Hydrogen Energy*. – 2023. – Vol. 48(11). – P. 4371–4388. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2023.02.056>
5. Singla M.K., Nijhawan P., Oberoi A.S. Hydrogen fuel and fuel cell technology for cleaner future: a review // *Environmental Science and Pollution Research*. – 2021. – Vol. 28(13). – P. 15607–15626. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-13278-7>
6. Pramuanoenroj A., Kakaç S. The fuel cell electric vehicles: The highlight review // *International Journal of Hydrogen Energy*. – 2023. – Vol. 48(25). – P. 9401–9425. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2023.04.005>
7. Luo Y., Wu Y., Li B., Mo T., Li Y., Feng S.P., Chu P.K. Development and application of fuel cells in the automobile industry // *Journal of Energy Storage*. – 2021. – Vol. 42. – P. 103124. <https://doi.org/10.1016/j.est.2021.103124>
8. Singh M., Zappa D., Comini E. Solid oxide fuel cell: Decade of progress, future perspectives and challenges // *International Journal of Hydrogen Energy*. – 2021. – Vol. 46(54). – P. 27643–27674. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2021.06.176>
9. Golkhatmi S.Z., Asghar M.I., Lund P.D. A review on solid oxide fuel cell durability: Latest progress, mechanisms, and study tools // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. – 2022. – Vol. 161. – P. 112339. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112339>
10. Xu Q., Guo Z., Xia L., He Q., Li Z., Bello I.T., Ni M. A comprehensive review of solid oxide fuel cells operating on various promising alternative fuels // *Energy Conversion and Management*. – 2022. – Vol. 253. – P. 115175. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2022.115175>
11. Peng J., Huang J., Wu X.L., Xu Y.W., Chen H., Li X. Solid oxide fuel cell (SOFC) performance evaluation, fault diagnosis and health control: A review // *Journal of Power Sources*. – 2021. – Vol. 505. – P. 230058. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2021.230058>
12. Corigliano O., Pagnotta L., Fragiaco P. On the technology of solid oxide fuel cell (SOFC) energy systems for stationary power generation: A review // *Sustainability*. – 2022. – Vol. 14(22). – P. 15276. <https://doi.org/10.3390/su142215276>
13. Tang M., Niu Y., Muhammad W., Muhammad S., Zhong Z., Muhammad S., Lv W. Advances in solid oxide fuel cell electrolyte fabrication by pulsed laser deposition // *International Journal of Hydrogen Energy*. – 2024. – Vol. 50. – P. 618–632. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2023.12.002>
14. Ahamad N., Banerjee S., Wei C.C., Lu K.C., Khedulkar A.P., Jian W.B., Lin H.C. Flexible Non-Enzymatic Glucose Sensors: One-Step Green Synthesis of NiO Nanoporous Films via an Electro-Exploding Wire Technique // *ACS Applied Materials & Interfaces*. – 2024. – Vol. 16(47). – P. 64494–64504. <https://doi.org/10.1021/acsami.3c13524>

ҚАТТЫ ОКСИДТІ ОТЫН ЭЛЕМЕНТТЕРІНЕ АРНАЛҒАН ЗЕРТТЕУ ҰЯШЫҚТАРЫН ӨЗІРЛЕУ ЖӘНЕ ЖАСАУ

С. Опахай*, К. А. Кутербек, К. Ж. Бекмырза, А. М. Кабышев,
М. М. Кубенова, Н. К. Айдарбеков, Ж. Жумадилова

Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Астана, Қазақстан

* Байланыс үшін E-mail: serikzhan.opakhai07@gmail.com

Бұл мақала әртүрлі температураларда қатты оксидті отын элементтерінің (ҚООЭ) сипаттамаларын зерттеуге арналған зерттеу ұяшықтарын әзірлеу мен жасауға арналған. Негізгі назар құрылымның тығыздығын қамтамасыз ететін жоғары температуралы шыны герметиктерді қолдануға аударылған. Мақалада үлгілік отын ұяшықтарын жасауға арналған материалдар мен әдістер сипатталған, соның ішінде электролиттердің (YSZ, ScSZ, GDC) және электродтардың (NiO, LSM) әртүрлі комбинациялары қарастырылады. Зерттеу ұяшықтарының құрылымында белсенді аймаққа түсетін газ қоспасының құрамын 0,5%-дан аспайтын ауытқулармен дәл бақылауды қамтамасыз ететін электрохимиялық сенсорлар бар. 700–950 °C температура диапазонында үлгілік ҚООЭ вольт-амперлік сипаттамаларын зерттеу нәтижелері температураның жоғарылауы омикалық шығындардың азаюына және электрохимиялық реакциялардың кинетикасының жақсаруына әкелетінін көрсетті. Материалдардың өткізгіштігі артып, электродтардың белсенділігі жақсарған сайын, жоғары температурада максималды қуат тығыздығы жоғары ток тығыздығымен қол жеткізілді. Төмен температураларда электролиттің қарсылығының артуы мен электродтардың белсенділігінің төмендеуіне байланысты ұяшықтардың тиімділігі шектелген. Өзірленген зерттеу ұяшықтары деректердің жоғары сенімділігі мен қайталанғыштығын көрсетті, бұл оларды ҚООЭ материалдары мен құрылымдарының құрамын оңтайландыру үшін пайдалануға мүмкіндік береді. Алынған нәтижелер ұсынылған әдістеменің жоғары тиімді отын элементтерін әзірлеудегі әлеуетін растайды.

Түйін сөздер: қатты оксидті отын элементтері, үлгілік отын ұяшықтары, зерттеу ұяшықтары, жоғары температуралы шыны герметиктер, электрохимиялық сенсорлар, вольт-амперлік сипаттамалар, қуат тығыздығы, омикалық шығындар, электрохимиялық реакциялардың кинетикасы.

РАЗРАБОТКА И СОЗДАНИЕ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИХ ЯЧЕЕК ДЛЯ ТВЕРДООКСИДНЫХ ТОПЛИВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

С. Опахай*, К. А. Кутербек, К. Ж. Бекмырза, А. М. Кабышев,
М. М. Кубенова, Н. К. Айдарбеков, Ж. Жумадилова

Евразийский национальный университет имени Л.Н. Гумилева, Астана, Казахстан

* E-mail для контактов: serikzhan.opakhai07@gmail.com

Статья посвящена разработке и созданию исследовательских ячеек для твердооксидных топливных элементов (ТОТЭ), предназначенных для изучения их характеристик при различных температурах. Основное внимание уделено использованию высокотемпературных стеклянных герметиков, обеспечивающих герметичность конструкции. В статье описаны материалы и методы изготовления модельных топливных ячеек, включая различные комбинации электролитов (YSZ, ScSZ, GDC) и электродов (NiO, LSM). Конструкция исследовательских ячеек включает электрохимические сенсоры, обеспечивающие точный контроль состава газовой смеси, поступающей в активную зону, с отклонениями, не превышающими 0,5%. Результаты исследований вольт-амперных характеристик модельных ТОТЭ в температурном диапазоне 700–950 °C показали, что повышение температуры приводит к снижению омических потерь и улучшению кинетики электрохимических реакций. Максимальная плотность мощности достигается при более высоких плотностях тока с увеличением температуры, что объясняется повышенной проводимостью материалов и улучшенной активностью электродов. При более низких температурах наблюдается ограниченная эффективность ячеек из-за увеличенного сопротивления электролита и сниженной активности электродов. Разработанные исследовательские ячейки продемонстрировали высокую надежность и воспроизводимость данных, что позволяет использовать их для оптимизации состава материалов и структуры ТОТЭ. Полученные результаты подтверждают потенциал предложенной методологии для разработки высокоэффективных топливных элементов.

Ключевые слова: твердооксидные топливные элементы (ТОТЭ), модельные топливные ячейки, исследовательские ячейки, высокотемпературные стеклянные герметики, электрохимические сенсоры, вольт-амперные характеристики, плотность мощности, омические потери, кинетика электрохимических реакций.

<https://doi.org/10.52676/1729-7885-2025-1-155-160>
УДК 57.04:635.652.2:581.522.5:581.45 (574.41)

ОЦЕНКА ВОЗДЕЙСТВИЯ Sr-90 НА ПРОВОДЯЩИЕ ТКАНИ ФАСОЛИ ОБЫКНОВЕННОЙ (*PHASEOLUS VULGARIS*)

Е. С. Сысоева*, Е. Н. Поливкина

Филиал «Институт радиационной безопасности и экологии» РГП НЯЦ РК, Курчатов, Казахстан

* E-mail для контактов: syssoeva@nnc.kz

В статье представлены результаты исследования влияния Sr-90 на проводящие ткани фасоли обыкновенной (*Phaseolus vulgaris*) в 3-х последовательных поколениях, выращенных в условиях модельного эксперимента. Мощность поглощенной дозы от внутреннего и внешнего облучения для каждого поколения фасоли за вегетационный период составила в среднем $9,5 \cdot 10^{-1}$ Гр и $1,7 \cdot 10^{-4}$ Гр, соответственно. Толщина проводящих тканей в 3-х последовательных поколениях фасоли изменялась в убывающем ряду: 1-ое поколение > 2-ое поколение > 3-е поколение \geq контрольная группа ($p < 0,05$). В совокупности, установленное увеличение толщины проводящих тканей стебля и листа в 3-х поколениях фасоли является ответной реакцией на стресс и направлено на поддержание гомеостаза на тканевом уровне биологической организации. Полученные закономерности характеризуют механизмы адаптации растений к высокому уровню загрязнения почвы радионуклидом Sr-90.

Ключевые слова: проводящие ткани, фасоль обыкновенная (*Phaseolus vulgaris*), стресс, адаптация, ионизирующее излучение.

ВВЕДЕНИЕ

Стресс у растений представляет собой состояние, при котором под действием внешнего фактора на организм сначала происходит нарушение функционального состояния, затем его нормализация и итоговое повышение сопротивляемости. Если интенсивность стрессового воздействия превышает пределы устойчивости и адаптивную способность растения, это может привести к серьезным повреждениям и к гибели организма [1–2].

Любые воздействия, изменяющие гомеостаз, влияющие на метаболизм растений, их рост или развитие могут рассматриваться в качестве стрессовых факторов. Стрессовые факторы могут иметь как естественную, так и антропогенную природу. При оценке последствий стрессовых воздействий учитывают кратковременный (неспецифический) стрессовый ответ, развивающийся в течение короткого промежутка времени после воздействия, и долгосрочный ответ на стрессовое воздействие [3]. Специфические адаптивные реакции растений, позволяющие им приспосабливаться к долговременному действию радиационного фактора менее изучены, чем неспецифические реакции растительных организмов на стрессовый фактор. Ионизирующее излучение может вызывать эффекты на разных уровнях организации растений – от молекулярно-клеточного до экосистемного. Качество и доза ионизирующего излучения влияют на конечный радиобиологический эффект, который может заключаться в поражении отдельных структур и функций организма, формировании уродств и аномалий развития, нарушении роста и размножения, а также приводить к гибели организма [4]. В зависимости от условий облучения и вида растения радиационное воздействие может приводить как к ингибирующим, так и к стимулирующим эффектам на морфологическом уровне.

В конечном итоге, ионизирующее излучение сказывается и на многих физиологических процессах: нарушаются процессы дыхания, фотосинтеза, наблюдаются изменения метаболизма и транспорта веществ. Проводящие ткани, такие как ксилема и флоэма, ответственны за транспорт воды, питательных веществ и других соединений в растении. Если радионуклиды попадают в почву или воду, они могут быть поглощены корнями и транспортированы через проводящие ткани в различные органы растения. Исследование данного процесса позволяет оценить, как радионуклиды распространяются в растении и влияют на его функционирование [5]. Исследование влияния радиоактивного загрязнения почвы на проводящие ткани, позволит понять механизмы адаптации и защиты растений от негативных последствий радиационного загрязнения. В данной работе представлены результаты исследования воздействия радиоактивного загрязнения почвы Sr-90 на проводящие ткани фасоли обыкновенной (*Phaseolus vulgaris*).

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Модельный эксперимент

В качестве экспериментальной культуры использовали фасоль обыкновенную (*Phaseolus vulgaris*). Выбор исследуемой культуры обусловлен коротким вегетационным периодом, устойчивостью к вредителям и болезням. Фасоль выращивали в контролируемых условиях экспериментальной оранжереи на почвенных образцах с территории площадки «4а», на которой в 1953–1957 годах проводились испытания боевых радиоактивных веществ (БРВ) (рисунок 1). Основным загрязнителем в почве данной площадки является радионуклид Sr-90, активность которого достигает $5 \cdot 10^8$ Бк/кг [6]. Контрольную группу растений выращивали на фоновой почве с идентичными физико-химическими свойствами.

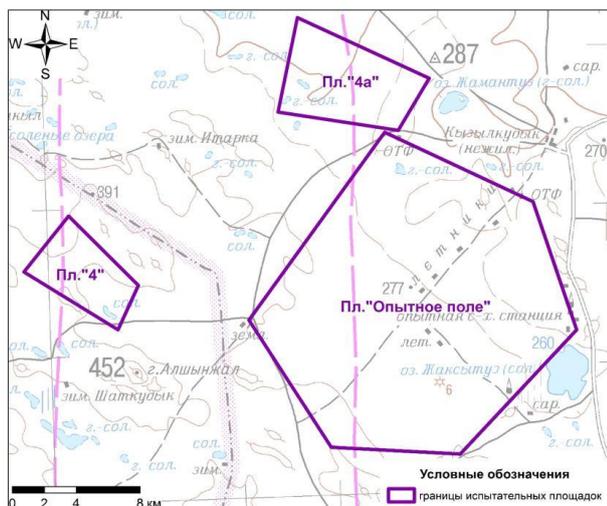
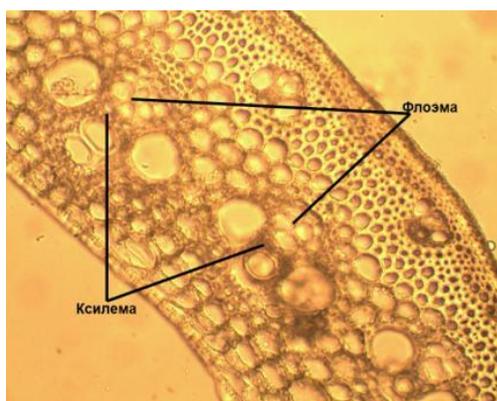


Рисунок 1. Расположение площадки «4а» на территории Семипалатинского полигона

В качестве исследуемых параметров использовали толщину флоэмы и ксилемы листа и стебля фасоли (рисунок 2).



а)



б)

Рисунок 2. Объект исследования, поперечный срез: лист фасоли (а); стебель фасоли (б), увеличение 20х

На протяжении вегетационного цикла каждого поколения фасоли поддерживались одинаковые условия произрастания: влажность почвы – 60% от по-

лойной влагоемкости), уровень освещенности – 10000 Лк, температурный режим – 25–27 °С.

Отбор листьев и стеблей производили в конце вегетационного цикла. Затем образцы консервировали в Копенгагенской смеси [7]. Из консервированных образцов готовили срезы при помощи санного микротомы МЗП-01 «Техном» (РФ). В среднем толщина среза составляла 30–60 мкм. Далее полученный срез осторожно смывали с ножа на предметное стекло при помощи пипетки и дистиллированной воды. Излишки влаги удаляли бумагой, фиксировали срез 98% глицерином, поверх накладывали покровное стекло. Исследования микропрепаратов проводили с использованием микроскопа Micros MC 300, оснащенного камерой Vision Cam V500/21 M (Австрия), при увеличении 4, 10, 20, 40 и 100х. Измерения толщины проводящих тканей проводили с использованием ПО BioWizad 4.2.

Лабораторные исследования

Пробы растений промывались и ополаскивались дистиллированной водой, затем высушивались при температуре 80–100 °С в сушильном шкафу до постоянной массы, после чего подвергались грубому измельчению до длины 1–3 см при помощи секатора. Более тонкое измельчение проводилось на лабораторной мельнице. Измельченная проба обугливалась в муфельной печи при начальной температуре 200–250 °С, с постепенно повышающейся температурой до 350–400 °С. Обугленные пробы передавали на радиохимическое выделение с последующим бета- и альфа-спектрометрическим измерением.

Пробы почвы высушивались до воздушно-сухого состояния в сушильных шкафах при температуре 60–70 °С, затем после удаления включений весь объем пробы тщательно перемешивался, истирался в фарфоровой ступке и просеивался через сито с диаметром отверстий 1 мм. После чего, методом квартования, отбирались необходимые навески почвы для определения удельной активности Sr-90.

Измерение удельной активности радионуклидов в пробах почвы и растений осуществляли в соответствии со стандартизированными методическими указаниями [8, 9]. Радионуклид Sr-90 определяли радиохимическим выделением с последующим измерением на бета-спектрометре TRI-CARB для растительных проб и на бета-спектрометре «Прогресс» для проб почвы. Предел обнаружения для Sr-90 составил 1–20 Бк/кг, а погрешность измерений не превышала 15%.

Статистический анализ

Для статистической обработки данных использовали пакет программ STATISTICA 12.0. Для каждого из исследуемых параметров определяли минимальные и максимальные значения, рассчитывали среднее арифметическое и ошибку среднего арифметического, медиану, среднеквадратичное отклонение и коэффициент вариации.

Каждую выборку предварительно проверяли на наличие выпадов для исключения резко отличающихся значений (артефактов). Проверка данных производилась по критерию, равному нормированному отклонению выброса [10].

Оценка достоверности различий исследуемых показателей между экспериментальными и контрольными выборками произведена при помощи F-критерия Фишера.

Для сравнения эмпирического распределения с теоретическим применяли критерий Колмогорова-Смирнова (λ). Полученные значения критерия во всех случаях меньше теоретических значений, что говорит о нормальном распределении значений в выборке [11].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

В результате исследования установлено, что наиболее интенсивное накопление Sr-90 в органах фасоли обыкновенной характерно для листовой пластины ($\sim 4,4 \cdot 10^6$ Бк/кг), меньшее содержание зафиксировано в стеблях ($\sim 2,3 \cdot 10^6$ Бк/кг), минимальное накопление отмечено в плодах исследуемой культуры ($\sim 7,7 \cdot 10^5$ Бк/кг).

Оценка дозовых нагрузок внутреннего и внешне-

го облучения растений проводилась согласно рекомендациям публикации №108 МКРЗ. Мощность дозы внутреннего облучения или внешнего облучения растений рассчитана как произведение удельной активности радионуклида в растении на соответствующий дозовый коэффициент [12].

Согласно ранее проведенным исследованиям, основную часть дозы растения получали от внутреннего облучения радионуклидом Sr-90. Вклад внешнего и внутреннего облучения от других радионуклидов в поглощенные растениями дозы незначителен [13]. Мощность внутренней поглощенной дозы за счет Sr-90 в фасоли обыкновенной за вегетационный период (120 суток) составила $9,5 \cdot 10^{-1}$ Гр, доза от внешнего облучения незначительна и составляет порядка $1,7 \cdot 10^{-4}$ Гр. Суммарная мощность дозы от внутреннего и внешнего облучения для исследуемой культуры превышает предел малых доз (0,1 Гр) [14, 15]. Таким образом, растения проявляют адаптивные реакции в ответ на высокие дозы ионизирующего излучения, значительно отличающиеся от горьезиса.

Всего произведено 3000 измерений параметров проводящих тканей листа и стебля фасоли. Результаты измерений исследуемых параметров представлены в таблице.

Таблица. Средние значения измерений проводящих тканей листа и стебля фасоли в 3-х последовательных поколениях

Вариационно-статистические показатели							
Параметр	n	Диапазон изменения, мкм		$\bar{x} \pm SD$, мкм (σ)		Me, мкм	
		эксп.	контр.	эксп.	контр.	эксп.	контр.
1-ое поколение							
S _{к.л.}	600	72–141	41–96	101±1 (15) 15	71±0,8 (12) 17	98	73
S _{к.с.}		154–246	100–136	202±2 (24) 12	119±0,7 (10) 9	202	115
S _{ф.л.}		60–121	32–88	88±1 (14) 16	68±0,8 (11) 16	87	70
S _{ф.с.}		108–231	86–128	187±2 (33) 18	106±0,7 (11) 10	191	107
2-ое поколение							
S _{к.л.}	600	72–135	40–96	91±0,9 (13) 15	71±0,8 (12) 16	90	73
S _{к.с.}		151–243	100–138	189±2 (28) 15	119±0,8 (11) 10	188	117
S _{ф.л.}		60–120	32–87	85±1 (18) 20	69±0,8 (11) 16	83	71
S _{ф.с.}		106–225	85–127	175±3 (40) 23	108±0,8 (11) 10	171	108
3-е поколение							
S _{к.л.}	600	50–99	41–89	74±0,8 (11) 15	70±0,8 (11) 16	75	73
S _{к.с.}		100–229	100–137	120±2 (34) 20	117±0,8 (11) 10	163	115
S _{ф.л.}		32–94	32–88	71±0,8 (11) 15	68±0,8 (11) 16	71	70
S _{ф.с.}		86–201	86–128	109±1 (16) 15	107±0,8 (11) 11	108	106

Примечание:

S_{к.л.} – толщина ксилемы листа, мкм
S_{ф.с.} – толщина флоэмы стебля, мкм
S_{к.с.} – толщина ксилемы стебля, мкм
S_{ф.л.} – толщина флоэмы листа, мкм

$\bar{x} \pm SD$ – среднее арифметическое, ошибка ср. арифметического
Me – медиана
 σ – среднеквадратичное отклонение
CV – коэффициент вариации

Согласно полученным данным, в большинстве случаев, значение медианы практически совпадает со средним арифметическим исследуемых параметров как в экспериментальной, так и контрольной выборке. Данный факт указывает на однородность полученных данных, что подтверждают и коэффициенты вариации, значения которых во всех случаях значительно ниже 50%. Так, максимум вариации отмечен для толщины флоэмы стебля (23%), а минимум – для толщины ксилемы стебля (9%).

Для проводящих тканей 3-х последовательных поколений фасоли, выращенных на радиоактивно загрязненной почве, установлены достоверные изменения толщины проводящих тканей стебля и листа (*при p < 0,05*). Максимальные значения исследуемых параметров отмечены в 1-ом поколении: толщина ксилемы и флоэмы стебля составила 202 и 187 мкм, а листа – 101 и 88 мкм, соответственно (см. таблицу).

Меньшие значения отмечены для тканей стебля и листа 2-го и 3-го поколения. Так, толщина ксилемы стебля составила 189 и 120 мкм, а флоэмы – 175 и 109 мкм соответственно. У листьев 2-го и 3-го поколения толщина ксилемы составила – 91 и 74 мкм, а флоэмы – 85 и 71 мкм, соответственно (см. таблицу).

Минимальные значения толщины проводящих тканей отмечены для контрольной группы: толщина ксилемы стебля и листа – 119 и 71 мкм, толщина флоэмы стебля и листа – 107 и 68 мкм, соответственно (см. таблицу).

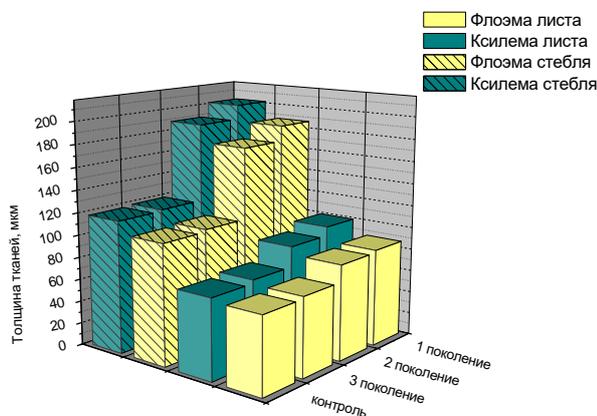


Рисунок 3. Изменение толщины проводящих тканей в 3-х последовательных поколениях фасоли

Сравнительный анализ результатов (рисунок 3) показал, что толщина ксилемы стебля и листа в экспериментальной группе 1-го, 2-го и 3-го поколения больше, чем в контрольной в среднем на 42, 37, 2% и 29, 23, 6%, соответственно. А толщина флоэмы стебля и листа 1-го, 2-го и 3-го поколения превышает аналогичные показатели в контроле на 43, 38, 2% и 22, 3, 3%, соответственно. При этом необходимо отметить, что толщина проводящих тканей фасоли 3-го поколения практически не отличалась от контроля. Таким образом, толщина ксилемы и флоэмы в 3-х последовательных поколениях изменялась в следу-

щем убывающем ряду: 1-ое поколение > 2-ое поколение > 3-е поколение ≥ контрольная группа.

Полученные закономерности изменения толщины проводящих тканей стебля и листа в 3-х поколениях фасоли, очевидно, являются совокупным результатом протекания адаптационных процессов. Так, в работе [16] также отмечено увеличение толщины клеточной стенки в ответ на различные дозы ионизирующего излучения. Результаты исследования воздействия стресса на биохимическом уровне [17, 18] показали, что при неблагоприятных условиях в клетках возрастает содержание протекторных веществ (углеводы, аминокислоты), участвующих в защитных реакциях, что, в свою очередь, приводит к увеличению размеров клеток и, как следствие, толщины тканей. Кроме того, стрессовый фактор может вызывать нарушение синтеза лигнина, в результате чего происходит утолщение клеточных стенок проводящих элементов флоэмы и ксилемы [19–21]. Чиркова [22] отмечает, что под воздействием стресса усиливается синтез активных форм кислорода и структурных полимеров, что приводит к утолщению клеточных стенок.

С другой стороны, повреждение клеток ксилемы и флоэмы может компенсироваться за счет изменения их количества и толщины для обеспечения нормального переноса воды, минеральных веществ и других соединений [23, 24].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенного исследования установлено, что высокий уровень удельной активности Sr-90 в почве оказывает значительное влияние на толщину проводящих тканей фасоли обыкновенной (*Phaseolus vulgaris*). Толщина проводящих тканей в 3-х последовательных поколениях фасоли изменялась в убывающем ряду: 1-ое поколение > 2-ое поколение > 3-е поколение ≥ контрольная группа. В совокупности, установленное увеличение толщины проводящих тканей стебля и листа фасоли обыкновенной (*Phaseolus vulgaris*) является ответной реакцией на стресс и направлено на поддержание гомеостаза на тканевом уровне биологической организации. Полученные закономерности характеризуют механизмы адаптации растений к высокому уровню загрязненности почвы радионуклидом Sr-90.

Исследования выполнены при финансовой поддержке Министерства энергетики Республики Казахстан в рамках научно-технической программы «Развитие атомной энергетики в Республике Казахстан» (ИРН – BR24792713).

ЛИТЕРАТУРА

- Des Marais D. L., Hernandez K. M., Juenger T. E. Genotype-by-environment interaction and plasticity: Exploring genomic responses of plants to the abiotic environment // Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics. – 2013. – Vol. 44, No. 1. – P. 5–29.

2. Leng G., Huang M. Crop yield response to climate change varies with crop spatial distribution pattern // *Scientific Reports*. – 2017. – Vol. 7, No. 1. – P. 1–10. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-01599-2>
3. Гуша Н. И. Влияние хронического облучения на адаптивный потенциал растений // *Радиационная биология. Радиоэкология*. – 2002. – № 2. – С. 155–157.
4. Корогодин В.И. Проблемы пострадиационного восстановления. – М.: Атомиздат, 1966. – 228 с.
5. Спиринов Д. А. Радиоэкологический сдвиг в фитоценозах и возможный критерий его прогнозирования // *Экология*. – 1988. – No. 4. – С. 25–29.
6. Kunduzbayeva A.Y., Lukashenko S.N., Kabdyrakova A.M., Larionova N.V., Magasheva R.Y., Bakirova G.A. Speciation of ¹³⁷Cs, ⁹⁰Sr, ²⁴¹Am, and ²³⁹⁺²⁴⁰Pu artificial radionuclides in soils at the Semipalatinsk test site // *Journal of Environmental Radioactivity*. – 2022. – Vol. 249. – P. 106867. <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2022.106867>
7. Уткина И. А. Ботаническая микротехника. Руководство к практическим занятиям. – Екатеринбург: Изд-во Уральского ун-та, 2001. – 58 с.
8. Методика определения содержания искусственных радионуклидов плутония-(239+240), стронция-90 в объектах окружающей среды. – Алматы. – 2010. – 25 с.
9. Активность радионуклидов в объемных образцах. Методика выполнения измерений на гамма-спектрометре: МИ 2143-91; МИ 5.06.001.98 РК. – Алматы. – 1998. – 18 с.
10. Плохинский Н. А. Биометрия. – М.: МГУ, 1970. – 367 с.
11. Шестаков Ю. Г. Математические методы в геологии. – Красноярск: Изд-во КГУ, 1988. – 208 с.
12. ICRP Environmental Protection: the Concept and Use of Reference Animals and Plants ICRP Approved by the Commission in October. Publication. – 2008. – 108 p.
13. Minknova K. S. Cytogenetic effects in crested hairgrass from a site where tests of military radioactive substances were conducted at the Semipalatinsk test // *Biology Bulletin*. – 2020. – Vol. 47, No. 12. – P. 1637–1650.
14. Котеров А. Н. Малые дозы и малые мощности доз ионизирующей радиации: регламентация диапазонов, критерии их формирования и реалии XXI века // *Медицинская радиология и радиационная безопасность*. – 2009. – № 3. – С. 5–26.
15. Caplin N., Willey N. Ionizing radiation, higher plants, and radioprotection: From acute high doses to chronic low doses // *Frontiers in Plant Science*. – 2018, No. 9. – P. 1–20. <https://doi.org/10.3389/fpls.2018.00847>
16. de Micco V., Arena C., Pignatola D., Durante M. Effects of sparsely and densely ionizing radiation on plants // *Radiation and Environmental Biophysics*. – 2011. – Vol. 50. – P.1–19. <https://doi.org/10.1007/s00411-010-0343-8>
17. Gudkov S. V., Grinberg M. A., Sukhov V., Vodenev V. Effect of ionizing radiation on physiological and molecular processes in plants // *Journal of Environmental Radioactivity*. – 2019. – Vol. 202. – P. 8–24. <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2019.02.001>
18. Mittler R. Oxidative stress, antioxidants and stress tolerance // *Trends in Plant Science*. – 2002. – Vol. 7(9). – P. 405–410.
19. Borzouei A., Kafi M., Khazaei H., Naseriyan B., Majdabadi A. Effects of gamma radiation on germination and physiological aspects of wheat (*Triticum aestivum* L.) seedlings // *Pakistan Journal of Botany*. – 2010. – Vol. 42. – P. 2281–2290.
20. Zhu J.-K. Abiotic Stress Signaling and Responses in Plants // *Cell*. – 2016. – Vol. 67, No. 2. – P. 313–324. <https://doi.org/10.1016/j.cell.2016.08.029>
21. Scheffer M., Bascompte J. Early-warning signals for critical transitions // *Nature*. – 2009. – Vol 461. – P. 53–59. <https://doi.org/10.1038/nature08227>
22. Чиркова Т. В. Физиологические основы устойчивости растений. – СПб: Изд-во СПб. ун-та, 2002. – 244 с.
23. Курсанов А. Л. Транспорт ассимилятов в растении. – М.: Наука, 1976. – 646 с.
24. Shimalina N. S., Pozolotina V. N., Orekhova N. A. Stress memory in two generations of *Plantago major* from radioactive and chemical contaminated areas after the cessation of exposure // *International Journal of Radiation Biology*. – 2023. – Vol. 99, No. 8. – P. 1228–1238. <https://doi.org/10.1080/09553002.2023.2146232>

REFERENCES

1. Des Marais D. L., Hernandez K. M., Juenger T. E. Genotype-by-environment interaction and plasticity: Exploring genomic responses of plants to the abiotic environment // *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*. – 2013. – Vol. 44, No. 1. – P. 5–29.
2. Leng G., Huang M. Crop yield response to climate change varies with crop spatial distribution pattern // *Scientific Reports*. – 2017. – Vol. 7, No. 1. – P. 1–10. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-01599-2>
3. Gusheva N. I. Influence of chronic exposure on the adaptive capacity of plants. // *Radiobiology. Radioecology*. – 2002. – No. 2. – P. 155–157.
4. Korogodin V. I. Problems of postradiation recovery. Moscow: Atomizdat, 1966. – 391 p.
5. Spirin D. A. Radioecological shift in phytocenoses and a possible criterion for its prediction // *Ekologiya*. – 1988. No. 4. – P. 25–29.
6. Kunduzbayeva A.Y., Lukashenko S.N., Kabdyrakova A.M., Larionova N.V., Magasheva R.Y., Bakirova G.A. Speciation of ¹³⁷Cs, ⁹⁰Sr, ²⁴¹Am, and ²³⁹⁺²⁴⁰Pu artificial radionuclides in soils at the Semipalatinsk test site // *Journal of Environmental Radioactivity*. – 2022. – Vol. 249. – P. 106867. <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2022.106867>
7. Utkina I. A. Botanical Microtechnics. Guide to Practical Classes. – Ekaterinburg: Publishing house of the Ural University, 2001. – 58 p.
8. Methodology for determining the content of artificial radionuclides plutonium-(239+240), strontium-90 in environmental objects. – Almaty. – 2010. – 25 p.
9. Radionuclide activity in bulk samples. Methods of measurements on gamma-spectrometer: MI 2143-91; MI 5.06.001.98 RK. – Алматы. – 1998. – 18 p.
10. Plokhinsky N. A. Biometrics. – Moscow: Publishing House of Moscow State University, 1970. – 367 p.
11. Shestakov Y. G. Mathematical Methods in Geology. – Krasnoyarsk.: Publishing House of Krasnoyarsk University, 1988. – 208 p.
12. ICRP Environmental Protection: the Concept and Use of Reference Animals and Plants ICRP Approved by the Commission in October. Publication. – 2008. – 108 p.
13. Minknova K. S. Cytogenetic effects in crested hairgrass from a site where tests of military radioactive substances

- were conducted at the Semipalatinsk test // *Biology Bulletin*. – 2020. – Vol. 47, No. 12. – P. 1637–1650.
14. Koterov A. N. Low doses and dose rates of ionizing radiation: regulations for dose ranges, their forming criteria and 21st century realities // *Medical radiology and radiation safety*. – 2009. No. 3. – P. 5–26.
 15. Caplin N., Willey N. Ionizing radiation, higher plants, and radioprotection: From acute high doses to chronic low doses // *Frontiers in Plant Science*. – 2018, No. 9. – P. 1–20. <https://doi.org/10.3389/fpls.2018.00847>
 16. de Micco V., Arena C., Pignalosa D., Durante M. Effects of sparsely and densely ionizing radiation on plants // *Radiation and Environmental Biophysics*. – 2011. – Vol. 50. – P. 1–19. <https://doi.org/10.1007/s00411-010-0343-8>
 17. Gudkov S. V., Grinberg M. A., Sukhov V., Vodeneev V. Effect of ionizing radiation on physiological and molecular processes in plants // *Journal of Environmental Radioactivity*. – 2019. – Vol. 202. – P. 8–24. <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2019.02.001>
 18. Mittler R. Oxidative stress, antioxidants and stress tolerance // *Trends in Plant Science*. – 2002. – Vol. 7(9). – P. 405–410.
 19. Borzouei A., Kafi M., Khazaei H., Naseriyan B., Majdabadi A. Effects of gamma radiation on germination and physiological aspects of wheat (*Triticum aestivum* L.) seedlings // *Pakistan Journal of Botany*. – 2010. – Vol. 42. – P. 2281–2290.
 20. Zhu J.-K. Abiotic Stress Signaling and Responses in Plants // *Cell*. – 2016. – Vol. 67, No. 2. – P. 313–324. <https://doi.org/10.1016/j.cell.2016.08.029>
 21. Scheffer M., Bascompte J. Early-warning signals for critical transitions // *Nature*. – 2009. – Vol 461. – P. 53–59. <https://doi.org/10.1038/nature08227>
 22. Chirkova T. V. Physiological Basis of Plant Resistance. – St. Petersburg: S.-Peterb. Gos. Univ., 2002. – 244 p.
 23. Kursanov A. L. Transport of assimilates in plants. – Moscow: Nauka, 1976. – 646 p.
 24. Shimalina N. S., Pozolotina V. N., Orekhova N. A. Stress memory in two generations of *Plantago major* from radioactive and chemical contaminated areas after the cessation of exposure // *International Journal of Radiation Biology*. – 2023. – Vol. 99, No. 8. – P. 1228–1238. <https://doi.org/10.1080/09553002.2023.2146232>

КӘДІМГІ ҮРМЕБҰРШАҚТЫҢ (*PHASEOLUS VULGARIS*) ӨТКІЗГІШ ТІНДЕРІНЕ Sr-90 ӘСЕРІН БАҒАЛАУ

Е. С. Сысоева*, Е. Н. Поливкина

ҚР ҰАО РМК «Радиациялық қауіпсіздік және экология институты» филиалы, Курчатова, Қазақстан

* Байланыс үшін E-mail: sysssoeva@nnc.kz

Мақалада Sr-90 қарапайым үрмебұршақтың (*Phaseolus vulgaris*) өткізгіш тіндеріне модельдік тәжірибе жағдайында өсірілген 3 ұрпақтағы әсерін зерттеу нәтижелері келтірілген. Вегетациялық кезеңде үрмебұршақтың әр буыны үшін ішкі және сыртқы сәулеленудің сіңірілген дозасының қуаты сәйкесінше орта есеппен $9,5 \cdot 10^{-1}$ Гр және $1,7 \cdot 10^{-4}$ Гр болды. Үрмебұршақтың қатарынан 3 ұрпағындағы өткізгіш тіндердің қалыңдығы азаю қатарымен кұбылады: 1-ші буын > 2-ші буын > 3-ші буын \geq бақылау тобы ($p < 0,05$). Бірге, үрмебұршақтың 3 буынында сабақ пен жапырақтың өткізгіш тіндерінің қалыңдығының белгіленген өсуі стресске қарсы жауабы болып табылады және биологиялық ұйымдастыру тіндік деңгейінде гомеостазды сақтауға бағытталған. Алынған заңдылықтар өсімдіктердің Sr-90 радионуклидмен топырақтың жоғары ластану деңгейіне бейімделу механизмдерін сипаттайды.

Түйін сөздер: өткізгіш ұлталар, кәдімгі үрмебұршақ (*Phaseolus vulgaris*), стресс, бейімделу, ионды сәуле шығару.

ASSESSMENT OF THE EFFECT OF Sr-90 ON THE CONDUCTIVE TISSUES OF THE COMMON BEAN (*PHASEOLUS VULGARIS*)

Y. S. Sysssoeva*, Y. N. Polivkina

Branch "Institute of Radiation Safety and Ecology" RSE NNC RK, Kurchatov, Kazakhstan

* E-mail for contacts: sysssoeva@nnc.kz

The article presents the results of a study on the effect of Sr-90 on the conductive tissues of the common bean (*Phaseolus vulgaris*) in three consecutive generations grown in a model experiment. The absorbed dose rate from internal and external radiation for each common bean generation during the growing season averaged $9.5 \cdot 10^{-1}$ G and $1.7 \cdot 10^{-4}$ G, respectively. The thickness of the conductive tissues in 3 consecutive generations of beans varied in descending order: 1st generation > 2nd generation > 3rd generation \geq control group ($p < 0.05$). Collectively, the established increase in the thickness of the conductive tissues of the stem and leaf in the 3rd generation of beans is a response to stress and is aimed at maintaining homeostasis at the tissue level of the biological organization. The obtained patterns characterize the mechanisms of plant adaptation to a high level of soil contamination with Sr-90 radionuclide.

Keywords: conductive tissues, common bean (*Phaseolus vulgaris*), stress, adaptation, ionizing radiation.

<https://doi.org/10.52676/1729-7885-2025-1-161-166>

УДК: 621.039.58

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ КОНТРОЛЯ БЕЗОПАСНОСТИ НА АТОМНЫХ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЯХ

Е. М. Елекеев^{1*}, Б. П. Степанов²

¹ АО «Самрук-Казына», Астана, Казахстан

² ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет», Томск, Россия

* E-mail для контактов: erbol.elekeev@mail.ru

В статье рассматривается использование математического моделирования для повышения безопасности атомных электростанций. Исследование показывает, что время реакции на аварийную ситуацию играет ключевую роль: если оператор принимает меры в течение 30 секунд, вероятность предотвращения аварии составляет 95%, но при задержке в 5 минут она падает до 30%. Также анализируется влияние профилактического обслуживания и резервирования оборудования. Без технического обслуживания вероятность отказа через 1000 часов эксплуатации достигает 40%, тогда как регулярные проверки снижают этот показатель до 15%, а резервные системы – до 8%. Дополнительно изучены каскадные отказы, которые могут привести к серьезным последствиям: при увеличении числа взаимозависимых компонентов с 3 до 10 риск полного отказа системы возрастает с 15% до 80%. В работе предлагаются практические рекомендации по повышению надежности АЭС, включая автоматизацию мониторинга, внедрение предиктивных алгоритмов и использование машинного обучения для прогнозирования возможных сбоев.

Ключевые слова: атомная электростанция, безопасность, моделирование, надежность, отказ, прогнозирование.

ВВЕДЕНИЕ

Атомные электростанции (АЭС) играют важную роль в обеспечении энергоснабжения многих стран, обеспечивая надежный и стабильный источник электроэнергии. Однако, несмотря на все преимущества, связанные с использованием атомной энергии, эксплуатация таких объектов несет в себе значительные риски. Аварийные ситуации на АЭС могут иметь катастрофические последствия, затрагивая не только окружающую среду, но и жизни миллионов людей. Исторические примеры, такие как Чернобыльская катастрофа в 1986 году и авария на Фукусиме в 2011 году, наглядно демонстрируют, к чему может привести недостаточное внимание к вопросам безопасности и отсутствие своевременной реакции на возникающие угрозы.

Современные методы контроля безопасности на АЭС базируются на анализе предыдущих инцидентов и применении регламентных процедур, направленных на минимизацию вероятности отказов оборудования и человеческих ошибок. Однако, такие методы не всегда позволяют оперативно реагировать на возникающие риски, так как основаны преимущественно на статистическом анализе данных. В условиях, когда требуется быстрое принятие решений, важность прогнозирования возможных отказов и аварий приобретает первостепенное значение. Именно поэтому математическое моделирование в сфере ядерной безопасности становится ключевым инструментом для повышения надежности атомных электростанций [1, 2]. Математические модели позволяют не только оценивать вероятность аварийных ситуаций, но и анализировать поведение оборудования в про-

цессе эксплуатации, предсказывать отказы, рассчитывать влияние различных факторов на надежность системы и разрабатывать оптимальные стратегии для быстрого реагирования. Использование вероятностных методов и стохастического моделирования дает возможность учитывать неопределенность процессов и минимизировать потенциальные риски [3–5].

В данной статье описываются исследования и методы математического моделирования для прогнозирования аварийных ситуаций, анализа надежности оборудования и оценки времени реакции на возможные инциденты. Исследование направлено на разработку системы, которая позволит количественно оценивать риски и формировать оптимальные стратегии для предотвращения аварий на атомных электростанциях. Особое внимание уделяется вопросам прогнозирования отказов оборудования, моделированию цепных аварийных процессов и анализу влияния времени принятия решений на вероятность предотвращения аварии.

Таким образом, основной целью исследования является разработка системы математического моделирования, позволяющей повысить уровень безопасности эксплуатации атомных электростанций. Рассмотренные модели будут использоваться для количественной оценки вероятностей отказов, оптимизации процессов принятия решений и минимизации последствий аварийных ситуаций.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В исследовании использовались методы математического моделирования, направленные на оценку рисков аварий на атомных электростанциях (АЭС), анализ надежности оборудования и прогнозирование

возможных отказов. В основе работы лежали вероятностные модели, стохастические процессы и дифференциальные уравнения, позволяющие количественно оценить влияние различных факторов на безопасность эксплуатации АЭС.

Одним из важнейших направлений анализа стало исследование влияния времени реакции операторов на вероятность предотвращения аварии. В экстренных ситуациях даже минимальная задержка в принятии решений может значительно повысить риск тяжелых последствий. Для математического описания этого явления использовалась *экспоненциальная модель деградации вероятности предотвращения аварии*, которая описывается следующим уравнением [6]:

$$\frac{dP_s}{dt} = -\lambda P_s, \quad (1)$$

где $P_s(t)$ – вероятность успешного предотвращения аварии в момент времени t ; λ – параметр интенсивности риска, зависящий от типа аварийной ситуации.

Решение этого уравнения:

$$P_s(t) = P_s(0)e^{-\lambda t}. \quad (2)$$

Эта зависимость демонстрирует, что вероятность предотвращения аварии уменьшается *экспоненциально* с увеличением времени реакции. В ходе численного моделирования были рассмотрены различные сценарии, в которых время реакции оператора изменялось от 10 секунд до 5 минут. Результаты показали, что при времени реакции 30 секунд вероятность успешного предотвращения аварии составляет 95%, но при задержке в 5 минут этот показатель снижается до 30% [7].

Следующим этапом исследования стало моделирование отказов оборудования. Все элементы технической системы со временем изнашиваются, что может привести к выходу из строя критически важных компонентов. Для прогнозирования отказов использовалась *марковская модель надежности*, которая позволяет учитывать возможные переходы системы из рабочего состояния в состояние отказа и последующего восстановления [8]:

$$\frac{dP_n}{dt} = \mu_{n-1}P_{n-1} - (\mu_n + \lambda_n)P_n + \lambda_{n+1}P_{n+1}, \quad (3)$$

где $P_n(t)$ – вероятность нахождения системы в состоянии отказа в момент времени t ; λ_n – интенсивность отказов оборудования; μ_n – интенсивность восстановления.

Численное решение этой системы уравнений позволило оценить вероятность отказа оборудования при различных режимах эксплуатации. Было рассмотрено три сценария: отсутствие профилактического обслуживания, регулярные профилактические осмотры раз в 500 часов и использование резервного оборудования. Полученные результаты показали, что без технического обслуживания вероятность отказа че-

рез 1000 часов работы достигает 40%, тогда как при профилактическом обслуживании она снижается до 15%. Если же используется резервное оборудование, риск полного отказа системы уменьшается более чем в 2,5 раза [9].

Особое внимание в работе было уделено анализу вероятности цепных отказов, когда сбой одной системы вызывает выход из строя других взаимосвязанных компонентов. Подобные ситуации представляют особую опасность, поскольку традиционные методы контроля не всегда позволяют предсказать их развитие. Для анализа таких явлений использовалась *вероятностная модель многосоставных отказов*, в которой вероятность полного отказа всей системы определяется следующим выражением [10]:

$$P_{total} = 1 - (1 - p)^n, \quad (4)$$

где P_{total} – вероятность каскадного отказа всей системы; p – вероятность отказа одной подсистемы; n – количество взаимозависимых компонентов.

Для решения уравнений использовались численные методы, включая метод конечных разностей для решения дифференциальных уравнений и алгоритмы вероятностного моделирования. Численные эксперименты проводились на основе многократных реализаций стохастических процессов, что позволило получить оценку вероятности каскадных отказов в зависимости от количества взаимозависимых элементов системы. Анализ зависимости показал, что при увеличении количества зависимых элементов с 3 до 10 вероятность полного отказа системы возрастает с 15% до 80%. Это демонстрирует, что чем больше взаимосвязанных компонентов в системе, тем выше вероятность каскадного отказа [11].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

В процессе численного моделирования были получены результаты, которые позволяют глубже понять, какие факторы влияют на надежность атомных электростанций. Было рассмотрено, как скорость реакции операторов может предотвратить аварию, насколько важны профилактическое обслуживание и резервирование оборудования, а также проанализировали риски каскадных отказов, когда один сбой запускает цепную реакцию отказов в других системах. Чтобы наглядно показать полученные закономерности, ниже представлено описание шести графиков, которые были построены на основе проведенных расчетов.

На рисунке 1 показано, как вероятность успешного предотвращения аварии зависит от скорости реакции. Чем быстрее операторы или автоматические системы обнаруживают проблему и принимают меры, тем выше шанс справиться с ситуацией.

Если авария замечена в первые 30 секунд, вероятность ее устранения составляет 95%. Однако если задержка составляет 2 минуты, этот показатель снижается до 60%, а при задержке 5 минут вероятность ус-

пешного предотвращения падает до 30%. Этот график подтверждает, что **оперативность – ключевой фактор безопасности**. Даже небольшая задержка в принятии решений может сделать ситуацию практически неуправляемой. Отсюда следует, что на АЭС нужно совершенствовать автоматические системы мониторинга, а персонал должен регулярно проходить тренировки, чтобы минимизировать время реакции.

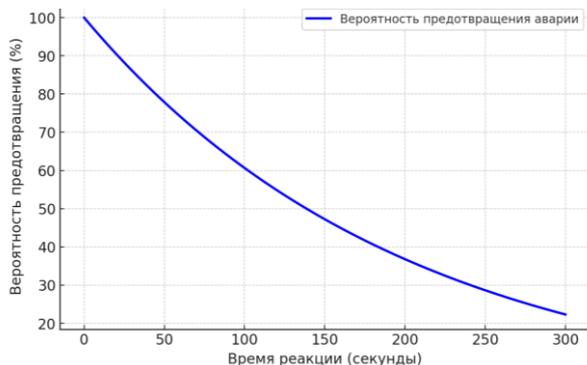


Рисунок 1. Экспоненциальное снижение вероятности предотвращения аварии

На рисунке 2 рассмотрено, как влияет техническое обслуживание на вероятность отказов оборудования. Здесь представлено три сценария:

- Без профилактики – оборудование работает без планового обслуживания;
- С регулярным обслуживанием – проверки и технические работы проводятся каждые 500 часов;
- С резервированием – помимо регулярного обслуживания, предусмотрены резервные компоненты.

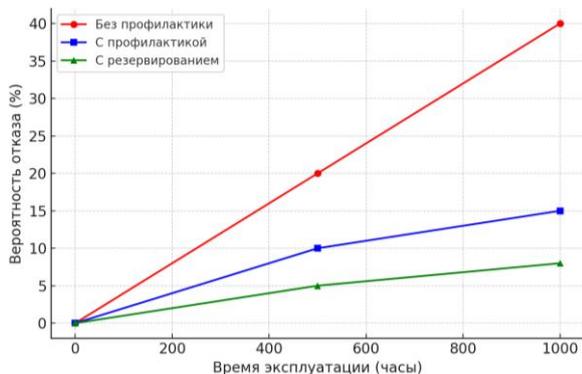


Рисунок 2. Влияние технического обслуживания на вероятность отказов оборудования

Если оборудование эксплуатируется без профилактики, вероятность отказа через 1000 часов составляет 40%. Но если выполнять регулярные проверки, этот показатель снижается почти втрое – до 15%. А если система включает резервные элементы, вероятность полного отказа сокращается в 2,5 раза. Профилактика и резервирование значительно повышают надежность работы оборудования. Именно поэтому на АЭС крайне важно не экономить на техническом

обслуживании и вовремя заменять изнашиваемые детали.

На рисунке 3 анализируется, как наличие резервного оборудования влияет на надежность системы в целом. График показывает, что чем больше резервных элементов предусмотрено, тем ниже вероятность полного отказа системы. Это особенно важно для таких критических компонентов, как системы охлаждения, насосные станции и устройства управления реактором.

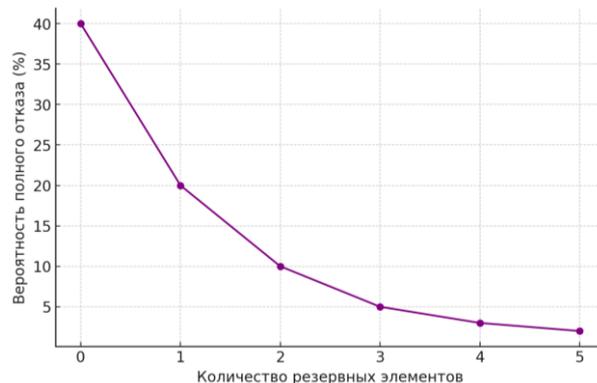


Рисунок 3. Влияние резервирования на надежность системы

Этот результат подтверждает, что резервирование – один из самых эффективных способов повышения надежности атомных станций. Если основной элемент выходит из строя, его работа может быть мгновенно подхвачена резервным узлом, что предотвращает развитие аварийной ситуации.

На рисунке 4 представлена гистограмма, которая показывает, через какое время чаще всего происходят отказы оборудования. Оказалось, что около 70% всех отказов случается в первые 500 часов эксплуатации. Это говорит о том, что многие сбои связаны с дефектами производства или ошибками в настройке системы после монтажа. После первых нескольких сотен часов работы вероятность отказов снижается, но при длительной эксплуатации без технического обслуживания риск снова начинает расти.

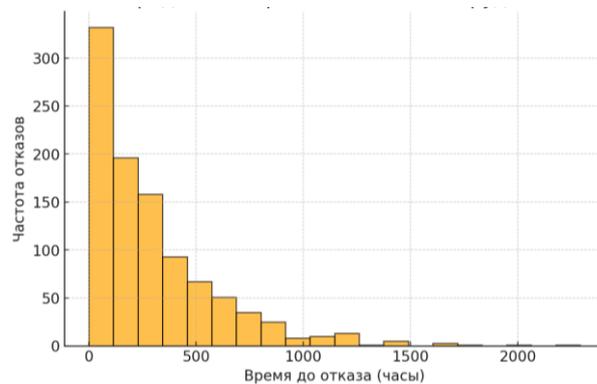


Рисунок 4. Гистограмма распределения времени отказов оборудования

Этот график подчеркивает, насколько важно контролировать оборудование в первые месяцы его работы и оперативно устранять дефекты, пока они не привели к серьезным последствиям.

На рисунке 5 исследовано влияние взаимосвязанных подсистем на общую надежность станции. Чем больше компонентов зависят друг от друга, тем выше риск того, что сбой одной системы вызовет цепную реакцию отказов.

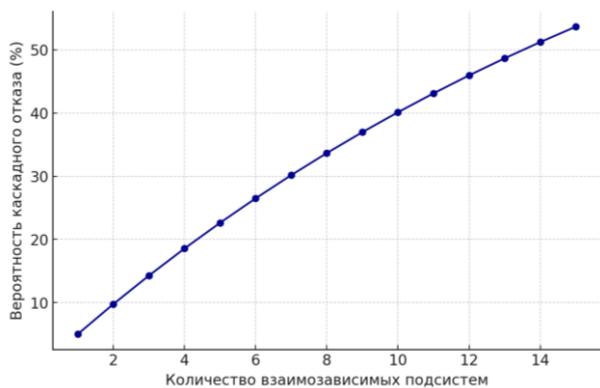


Рисунок 5. Влияние взаимосвязанных подсистем на вероятность отказа

График показывает, что при трех взаимосвязанных системах вероятность полного отказа составляет 15%. Если компонентов уже пять, вероятность возрастает до 30%, а при десяти взаимосвязанных элементах риск катастрофического отказа превышает 80%.

Это означает, что чем больше сложных взаимосвязанностей в системе, тем выше вероятность каскадного отказа. Чтобы минимизировать этот риск, важно:

- Разрабатывать автономные системы, которые могут продолжать работать независимо от состояния других модулей;
- Внедрять локальное резервирование, чтобы при отказе одной системы ее функции временно брал на себя ближайший модуль;
- Использовать предиктивные алгоритмы, которые заранее выявляют узлы, находящиеся в зоне риска.

Проведенное исследование показывает, что безопасность атомных электростанций зависит от скорости реакции на аварийные ситуации, качества технического обслуживания и эффективности резервных систем. Вероятность предотвращения аварии снижается с увеличением времени реакции, поэтому автоматизация мониторинга и подготовка персонала играют ключевую роль. Регулярное обслуживание оборудования значительно уменьшает риск отказов, а резервирование позволяет избежать критических ситуаций. Анализ показал, что большинство отказов происходит в первые 500 часов эксплуатации, что подчеркивает важность тщательного контроля на ранних стадиях работы оборудования. Чем больше

взаимозависимых компонентов в системе, тем выше вероятность каскадного отказа, поэтому необходимы автономные системы и прогнозирующие алгоритмы. Эти результаты подтверждают необходимость комплексного подхода к обеспечению надежности АЭС и внедрения современных методов моделирования для предотвращения аварий.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенное исследование подтвердило важность математического моделирования для повышения безопасности атомных электростанций. Рассмотрены ключевые факторы, влияющие на надежность эксплуатации АЭС, включая скорость реакции операторов, профилактическое обслуживание оборудования, резервирование критически важных систем и влияние каскадных отказов на общую устойчивость станции.

Результаты численного моделирования показали, что вероятность успешного предотвращения аварии экспоненциально снижается с увеличением времени реакции. Если в первые 30 секунд вероятность устранения инцидента составляет 95%, то при задержке в 5 минут она падает до 30%. Это подтверждает необходимость совершенствования автоматизированных систем мониторинга и подготовки персонала к быстрому реагированию. Исследование надежности оборудования выявило, что без профилактического обслуживания вероятность отказа через 1000 часов эксплуатации достигает 40%. Однако регулярные осмотры и техническое обслуживание позволяют снизить этот показатель до 15%, а при наличии резервных систем – до 8%. Это подчеркивает важность своевременного контроля за техническим состоянием оборудования и внедрения дублирующих компонентов для предотвращения критических отказов. Особое внимание было уделено анализу каскадных отказов, возникающих из-за взаимосвязанности систем. Математическое моделирование показало, что вероятность полного отказа станции возрастает с увеличением количества взаимосвязанных компонентов: если в системе три взаимосвязанных элемента, риск отказа составляет 15%, а при десяти – уже 80%. Эти результаты свидетельствуют о необходимости разработки автономных модулей, минимизирующих влияние отказов друг на друга, а также внедрения предиктивных алгоритмов, позволяющих заранее выявлять узлы, находящиеся в зоне риска.

Таким образом, проведенные исследования подтверждают, что математическое моделирование является эффективным инструментом для прогнозирования отказов, анализа рисков и разработки стратегий предотвращения аварий. Использование вероятностных моделей, стохастических процессов и численных методов позволяет не только оценивать вероятность аварийных ситуаций, но и разрабатывать оптимальные алгоритмы быстрого реагирования. Практическая значимость работы заключается в том, что полученные результаты могут быть применены для

повышения надежности атомных электростанций за счет совершенствования регламентных процедур, разработки более эффективных систем диагностики и мониторинга, а также внедрения интеллектуальных технологий предсказания отказов. Перспективными направлениями дальнейших исследований являются использование методов машинного обучения и нейросетевых моделей для более точного прогнозирования аварийных ситуаций, разработка автоматизированных систем принятия решений на основе больших данных, а также создание комплексных цифровых двойников, позволяющих тестировать различные сценарии работы АЭС в виртуальной среде. Внедрение этих технологий позволит существенно повысить уровень безопасности атомной энергетики, снизить вероятность аварийных ситуаций и минимизировать потенциальные риски.

ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES

1. Gomes J. et al. Development of the Reliability Assurance Program in a Brazilian nuclear power plant subsidized by a Reliability, Availability and Maintainability Model // Brazilian Journal of Radiation Sciences. – 2023. – Vol. 11. – No. 4. – P. 01–18.
2. Dimitrov D., Randelova N. Management systems for nuclear security // Security & Future. – 2024. – Vol. 8. – No. 1. – P. 7–10.
3. Park J. K., Kim T. K., Koo S. R. Verification strategy for artificial intelligence components in nuclear plant instrumentation and control systems // Progress in Nuclear Energy. – 2023. – Vol. 164. – P. 104842.
4. Odarushchenko O. et al. Application of Formal Verification Methods in a Safety-Oriented Software Development Life Cycle // 2023 13th International Conference on Dependable Systems, Services and Technologies (DESSERT). – IEEE, 2023. – P. 1–6.
5. Wang L., Wu Y. Verification and validation optimization method for signal quality bits in digital control system application software of nuclear power plant // Kerntechnik. – 2024. – Vol. 89. – No. 3. – P. 301–315.
6. Enderlein, G., Barlow, E. E., F. Proschan and L. C. Hunter: Mathematical Theory of Reliability. Wiley, New York-London-Sydney, 1965. 256 S., Preis 83 s. Biom. J. – 1966. – Vol. 8, Issue 4. – P. 278–278. <https://doi.org/10.1002/bimj.19660080409>
7. Howard R. Dynamic Probabilistic Systems, Volume 2: Semi-Markov and Decision Processes. New York: Dover, 1971.
8. Dhillon B. S., Singh Ch. Engineering reliability: New techniques and applications. N.Y.: John Wiley & Sons Inc. Publ., 1981. 362 p.
9. Cox, D.R. (1977). The Theory of Stochastic Processes (1st ed.). Routledge. <https://doi.org/10.1201/9780203719152>
10. Ebeling C. E. An introduction to reliability and maintainability engineering. – Waveland Press, 2019.
11. Leveson N. G. Engineering a safer world: Systems thinking applied to safety. – The MIT Press, 2016. – 560 p.

ЯДРОЛЫҚ ЭЛЕКТР СТАНЦИЯЛАРЫНДА ҚАУІПСІЗДІКТІ БАҚЫЛАУ ПРОЦЕСТЕРІНІҢ МАТЕМАТИКАЛЫҚ ҮЛГІЛЕНУІ

Е. М. Елекеев^{1*}, Б. П. Степанов²

¹ АҚ «Самрук-Казына», Астана, Қазақстан

² «Ұлттық зерттеу Томск политехникалық университеті»
Федералдық мемлекеттік автономиялық жоғары оқу орны, Томск, Ресей

* Байланыс үшін E-mail: erbol.elekeev@mail.ru

Мақалада ядролық электр станцияларының қауіпсіздігін арттыру мақсатында математикалық үлгілеуді қолдану қарастырылады. Зерттеу нәтижелері апаттық жағдайларға жауап беру уақытының маңызды рөл атқаратынын көрсетеді: егер оператор 30 секунд ішінде шара қабылдаса, апаттың алдын алу ықтималдығы 95%-ды құрайды, ал 5 минуттық кешігу кезінде бұл көрсеткіш 30%-ға дейін төмендейді. Сонымен қатар, профилактикалық қызмет көрсету мен резервтік жабдықтардың сенімділікке әсері талданады. Егер техникалық қызмет көрсетілмесе, 1000 сағаттық пайдалану кезеңінде істен шығу ықтималдығы 40%-ға жетеді, ал жүйелі тексерулер бұл көрсеткішті 15%-ға, резервтік жүйелерді қолдану 8%-ға дейін төмендетеді. Сонымен бірге, өзара тәуелді жүйелердің істен шығуы зерттелді: компоненттер саны 3-тен 10-ға дейін артқан кезде, жалпы істен шығу қаупі 15%-дан 80%-ға дейін өседі. Жұмыста АЭС сенімділігін арттыру бойынша тәжірибелік ұсыныстар беріледі, атап айтқанда, мониторингті автоматтандыру, болжамды алгоритмдерді енгізу және ықтимал істен шығуларды болжау үшін машиналық оқытуды қолдану.

Түйінді сөздер: ядролық электр станциясы, қауіпсіздік, үлгілеу, сенімділік, істен шығу, болжам.

**MATHEMATICAL MODELING OF SAFETY CONTROL PROCESSES
AT NUCLEAR POWER PLANTS**

Y. M. Yelekeev^{1*}, B. P. Stepanov²

¹ *«Samruk-Kazyna» JSC, Astana, Kazakhstan*

² *Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education
“National Research Tomsk Polytechnic University”, Tomsk, Russia*

* *E-mail for contacts: erbol.elekeev@mail.ru*

This paper examines the use of mathematical modeling to enhance the safety of nuclear power plants (NPPs). The study demonstrates that reaction time plays a crucial role in accident prevention: if an operator takes action within 30 seconds, the probability of preventing an accident is 95%, whereas a 5-minute delay reduces this probability to 30%. The impact of preventive maintenance and system redundancy on reliability is also analyzed. Without maintenance, the probability of equipment failure after 1000 hours of operation reaches 40%, whereas regular inspections reduce this to 15%, and redundancy further lowers it to 8%. Additionally, cascading failures were studied, showing that as the number of interdependent components increases from 3 to 10, the risk of total system failure rises from 15% to 80%. The paper provides practical recommendations for improving NPP reliability, including the automation of monitoring, the implementation of predictive algorithms, and the use of machine learning for failure forecasting.

Keywords: *nuclear power plant, safety, modeling, reliability, failure, forecasting.*

<https://doi.org/10.52676/1729-7885-2025-1-167-174>
УДК 546.26: 630*114(574)

ИССЛЕДОВАНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ РАДИОУГЛЕРОДА В ПОЧВЕ ЛЕСНЫХ ЭКОСИСТЕМ РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН

А. К. Айдарханова*, А. А. Сарсенова*, А. С. Мамырбаева,
Н. В. Ларионова, Ж. Е. Тлеуканова, А. О. Айдарханов

Филиал «Институт радиационной безопасности и экологии» РГП НЯЦ РК, Курчатов, Казахстан

* E-mail для контактов: almira@nnc.kz

В данной работе представлены данные распределения радиоуглерода (^{14}C) в почвах лесных экосистем Республики Казахстан. В качестве объектов исследования рассмотрены лесные участки Бескарагайского района области Абай и Бурабайского района Акмолинской области. Определение ^{14}C выполнено методом жидкостной сцинтилляционной спектрометрии. Результаты исследования показали, что в почвах Бескарагайского района наблюдается повышенное содержание ^{14}C , в постепенном снижении от верхних слоев к нижним, что, по всей видимости, связано с радиоактивным загрязнением, вызванным испытаниями на Семипалатинском испытательном полигоне. В почвах Бурабайского района содержание ^{14}C находится ниже предела обнаружения.

Ключевые слова: радиоуглерод (^{14}C), жидкостно-сцинтилляционный метод, почва, лесная подстилка, Семипалатинский испытательный полигон (СИП).

ВВЕДЕНИЕ

Один из наиболее достоверных методов оценки климатических изменений с течением времени – метод датирования, основанный на применении радиоактивного изотопа углерода – радиоуглерода (^{14}C) с периодом полураспада 5730 ± 40 лет [1].

Земля и её атмосфера постоянно подвергаются воздействию потоков радиоактивных частиц из межзвёздного пространства. В верхних слоях атмосферы под влиянием космических лучей из атмосферного азота образуется радиоуглерод. Химически активный изотоп ^{14}C почти мгновенно окисляется до ^{14}CO , а затем, в течение нескольких недель, до $^{14}\text{CO}_2$. Этот радиоактивный диоксид углерода постепенно диффундирует к нижним слоям атмосферы и смешивается с обычной углекислотой. Радиоуглерод, образовавшийся в виде $^{14}\text{CO}_2$, включается в биогеохимический цикл обращения углерода. Из атмосферы он переходит в биосферу, захватываясь в виде CO_2 растениями в ходе фотосинтеза и поглощается поверхностными слоями океана. Почвы в углеродном цикле играют значительную роль [2].

Если поток космических лучей постоянен, то общее количество атмосферного ^{14}C должно находиться в равновесии (подвижное равновесие между распадом и образованием ^{14}C , которое может со временем нарушаться). Однако, возможны отклонения.

Определенное значение имеет антропогенное воздействие, связанное с массовым использованием ископаемого топлива. Китай, например, является крупнейшим в мире источником выбросов CO_2 , на его долю приходится около 30% от общего объема мировых выбросов [3]. В работе [4] приведены результаты о применении метода радиоуглеродного датирования для отслеживания содержания CO_2 в топливе в 15 городах Китая. Результаты исследования выявили значительные различия в показателях между большинством городов, что свидетельствует о разнообразии источников и масштабов выбросов CO_2 в различных регионах страны.

Содержание ^{14}C в почве может быть индикатором длительности нахождения органической компоненты почвы в масштабах от веков до тысячелетий, поскольку оно снижается со временем в результате радиоактивного распада ^{14}C . С помощью метода радиоуглеродного датирования было установлено, что в период около 2600–2500 лет назад на юге Приуралья произошло резкое изменение климата, связанное преимущественно с увеличением увлажненности. Это открытие было сделано при исследовании материалов из курганов ранних кочевников [5].

Испытания оружия в атмосфере, проводившиеся в 50-е – 60-е годы XX века привели к попаданию большого количества «бомбового» ^{14}C в атмосферу. При этом пиковое значение, которое приходится на 1964 г. почти в два раза превышает содержание ^{14}C природного происхождения [6, 7]. После подписания Договора о запрещении испытаний ядерного оружия в атмосфере, в космическом пространстве и под водой в 1963 г., количество ^{14}C в атмосферном CO_2 значительно снизилось, поскольку «бомбовый» ^{14}C переместился в океанические и земные резервуары. Таким образом, глобальный «бомбовый всплеск» ^{14}C позволяет оценить, сколько органического углерода, зафиксированного за счет фотосинтеза, вошло в состав органического вещества почвы [8].

Испытания, проводимые на Семипалатинском испытательном полигоне (СИП), сформировали радиоактивное загрязнение не только территории полигона, но и далеко за его пределами. При этом, основным источником радиоактивного загрязнения за пределами полигона являлись так называемые «следы радиоактивных выпадений» от атмосферных ядерных испытаний.

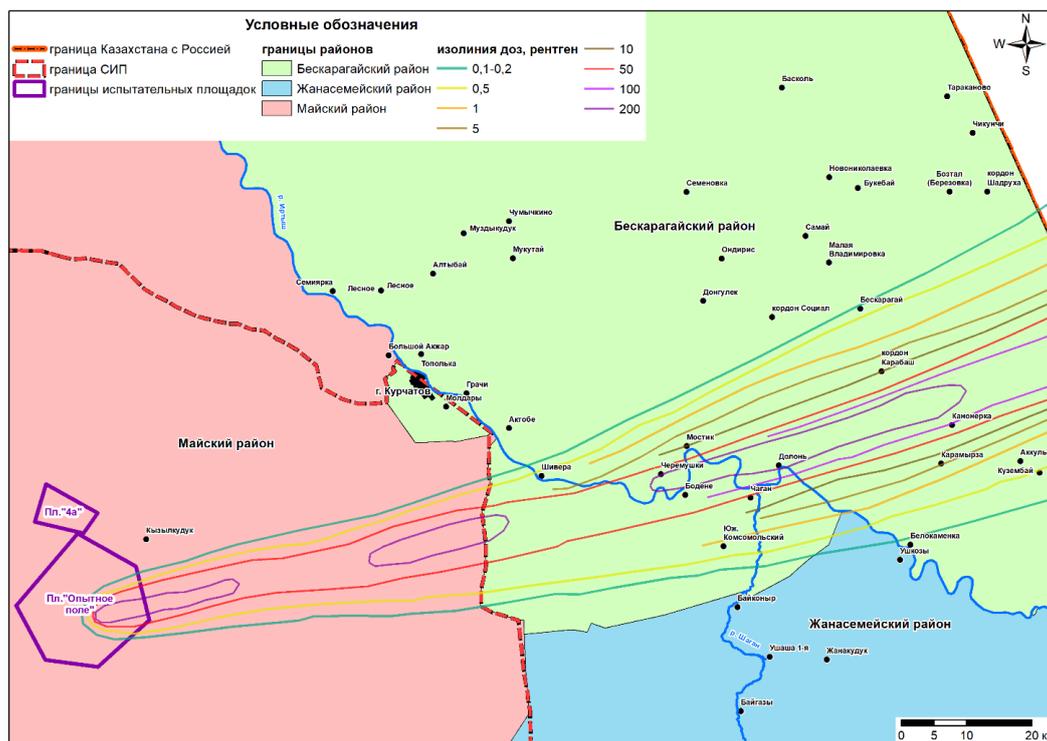


Рисунок 1. «Восточный след» радиоактивных выпадений от первого ядерного испытания в СССР (29 августа 1949 г.)

Первое ядерное испытание в СССР, проведенное 29 августа 1949 г. образовало узкий радиоактивный след в северо-восточном направлении, так называемый «восточный след» (рисунок 1). Территория, подвергшаяся загрязнению, простиралась постепенно расширяющейся полосой до расстояния примерно 700 км от границы полигона при ширине следа до 130 км. Радиоактивному загрязнению подверглись Новопокровский и Beskaragayskiy районы Семипалатинской области (ныне область Абай, Республика Казахстан) и несколько районов Алтайского края (Российская Федерация) [9].

Для проведения исследований по распределению ^{14}C в почве, участки для отбора проб не должны иметь техногенную нарушенность и быть достаточно обогащены углеродом. Для подобных исследований в большей степени подходят лесные почвы. Лесные почвы обладают пространственной изменчивостью, причины которой многочисленны, например, тип основания материнских пород, климат, растительность, нарушенность и другие комбинированные эффекты. Также лесные почвы лучше всего отражают средние физико-химические свойства (включая содержание органического углерода) исследуемого участка [10]. Леса играют ключевую роль в регулировании климата на планете, поглощая углерод и влияя на температуру. Они содержат 660 млн тонн углерода – это более половины глобального запаса углерода в почвах и растительности [11].

Согласно данным Комитета лесного хозяйства и животного мира Министерства экологии и природ-

ных ресурсов Республики Казахстан, лесной фонд занимает 11,2% территории Республики. Лесистость страны составляет всего 5% [12].

Леса представлены четырьмя основными видами: леса лесостепной и степной зон, горные леса, тугайные и саксауловые леса. Леса в Казахстане располагаются крайне неравномерно. Типы лесной растительности обуславливаются разнообразием природных зон. В пустынной зоне произрастают саксауловые леса. Основная часть горных лесов представлена темнохвойными насаждениями Алтая, Джунгарского и Заилийского Алатау. В равнинной части степной и лесостепной зон произрастают березово-осиновые колочные леса, островные сосновые боры, ленточные боры Прииртышья [13].

Цель данной работы – предварительная оценка содержания ^{14}C в почвах лесных экосистем равнинной части территории Республики Казахстан.

1. МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

1.1. Объекты исследования

В связи с тем, что саксауловые леса распространены на сильно обедненных органической составляющей и слабо развитых почвах, а горные леса являются труднодоступными с высокой долей обломков скальных пород в почвах, на которых они произрастают, для проведения исследований были выбраны равнинные участки степной зоны Республики Казахстан. Объектами исследования являлись почвы лесов Beskaragayskiy района области Абай и Бурабайского района Акмолинской области (рисунок 2).

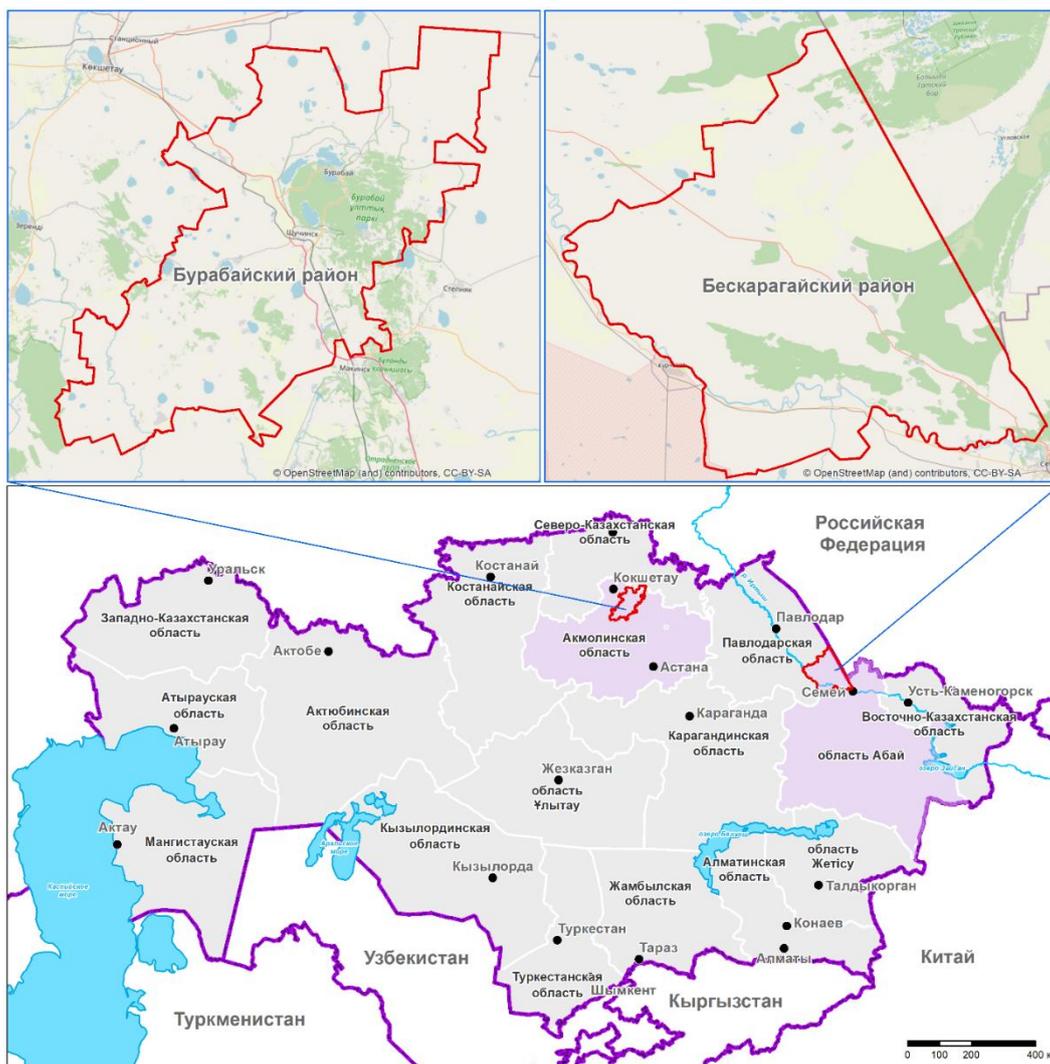


Рисунок 2. Расположение участков исследований

В области Абай в пределах Бескарагайского и Бородулихинского административных районов распространены сосновые леса. В Бескарагайском районе сосновые леса представляют собой окончание Барнаульской и Касмалинской лент, произрастающие на каштановых типах почв. Местность произрастания лесов характеризуется как выровненным, так и всхолмленным бугристым рельефом [14]. В Бурабайском районе Акмолинской области сосновые леса расположены вокруг озера Боровое, в степной зоне на возвышенности северо-западной части Казахского мелкосопочника. Почвенный покров отличается разнообразием черноземов – от горнолесных буроземных до лугово-черноземных почв [15]. Также в данных районах встречаются осиновые и березовые леса.

1.2. Отбор проб

Для проведения исследований выполнены экспедиционные работы, в ходе которых отобраны пробы почвы и лесной подстилки осинового (т.1) и соснового (т.2) лесов в Бескарагайском районе области Абай,

и березового (т.1 и т.2) и соснового (т.3) лесов Бурабайском районе Акмолинской области. Участки отбора проб представлены на рисунке (рисунок 3). В Бескарагайском районе участки, на которых проводились исследования, располагались в границах прохождения следа от испытания 1949 г. с предполагаемо повышенным содержанием радионуклидов в компонентах природной среды.

На выбранных участках проведен отбор проб лесной подстилки и послойный отбор проб почвы до глубины 50 см. Для отбора проб выбирались участки с ненарушенной поверхностью площадью 1 м². Перед отбором проб почвы проводился отбор пробы лесной подстилки, а затем зачистка поверхностного слоя от подстилки. С подготовленного участка отбор проб почвы проводился методом выкапывания шурфа. Глубина шурфа составляла не менее 60 см. Отбор проб проводился послойно с поверхности шурфа с интервалом в 10 см до глубины 50 см. Каждый отобранный слой почвы (проба) герметично упаковывался в полиэтиленовый пакет.

Таблица 1. Физико-химический анализ почвы

№	Точка и место отбора	Глубина отбора, см	Гумус, %	Механический состав, содержание физической глины (частиц с d <0,01 мм), %	Гигроскопическая влага, %
1	т.1, осиновый лес, Бескарагайский район	0–10	–*	6,13	9,43
2		10–20	–*	6,65	14,33
3		20–30	–*	4,94	12,92
4		30–40	–*	4,18	5,91
5		40–50	–*	3,61	2,54
6	т.2, сосновый лес, Бескарагайский район	0–10	0,76	2,41	0,34
7		10–20	0,86	3,05	0,28
8		20–30	0,51	3,10	0,29
9		30–40	0,43	3,32	0,29
10		40–50	0,30	3,40	0,30
11	т.1, березовый лес, Бурабайский район	0–10	–*	2,75	3,60
12		10–20	6,07	1,72	0,37
13		20–30	3,02	1,28	0,23
14		30–40	2,93	0,59	0,13
15		40–50	1,43	0,87	0,13
16	т.2, березовый лес, Бурабайский район	0–10	4,98	4,87	1,14
17		10–20	3,95	6,64	1,23
18		20–30	2,00	1,90	1,60
19		30–40	1,23	0,67	0,96
20		40–50	1,66	0,17	0,94
21	т.3, сосновый лес, Бурабайский район	0–10	–*	11,21	13,04
22		10–20	3,44	22,07	5,57
23		20–30	2,46	23,10	5,51
24		30–40	1,50	20,46	4,98
25		40–50	2,01	28,87	6,65

Примечание: * – согласно [19], использованный метод не пригоден для проб с массовой долей органического вещества более 15%

В почвах Бурабайского района в верхних слоях 2-х участков исследования содержание органического вещества превышает 15%. В целом, в почвах березового и соснового лесов органическое вещество в верхних слоях достигает 3,5–6%. С глубиной его содержание закономерно снижается до 1,4–2,0%. По составу почвы березового леса относятся к рыхло- и связанно-песчаным почвам с количеством частиц физической глины (<0,01 мм) порядка 3% и 7%, соответственно. Почва соснового леса отличается легкосуглинистым составом с количеством частиц физической глины (<0,01 мм) порядка 30%.

Результаты определения содержания ¹⁴C в отобранных образцах почвы и лесной подстилки представлены в таблице 2.

Согласно полученным результатам, повышенным содержанием ¹⁴C характеризуется Бескарагайский район. Максимальная концентрация ¹⁴C для всех исследуемых участков зафиксировано в почвенной подстилке: до 410 Бк/кг (Бескарагайский район) и до 50 Бк/кг (Бурабайский район).

Таблица 2. Результаты определения ¹⁴C в почве и лесной подстилке

№	Точка и место отбора	Глубина отбора, см	Удельная активность ¹⁴ C, Бк/кг
1	т.1, осиновый лес, Бескарагайский район	лесная подстилка	410 ± 60
2		0–10	70 ± 10
3		10–20	330 ± 50
4		20–30	40 ± 6
5		30–40	< 6
6		40–50	< 6
7	т.2, сосновый лес, Бескарагайский район	лесная подстилка	335 ± 50
8		0–10	245 ± 37
9		10–20	40 ± 6
10		20–30	< 6
11		30–40	20 ± 3
12		40–50	20 ± 3
13	т.1, березовый лес, Бурабайский район	лесная подстилка	10 ± 3
14		0–10	< 6
15		10–20	< 6
16		20–30	< 6
17		30–40	< 6
18		40–50	< 6
19	т.2, березовый лес, Бурабайский район	лесная подстилка	30 ± 5
20		0–10	< 6
21		10–20	< 6
22		20–30	< 6
23		30–40	< 6
24		40–50	< 6
25	т.3, сосновый лес, Бурабайский район	лесная подстилка	50 ± 8
26		0–10	< 6
27		10–20	< 6
28		20–30	< 6
29		30–40	< 6
30		40–50	< 6

Сравнительно более высокие значения удельной активности ¹⁴C в почве и лесной подстилке установлены для участков с более тяжелым механическим составом почв и повышенным содержанием в них гигроскопической влаги (таблица 1): осиновый лес Бескарагайского района (т.1) и сосновый лес Бурабайского района (т.3). Для т.1 в осиновом лесу в отличие от т.2 соснового леса Бескарагайского района также отмечается высокое содержание в почве гумуса (таблица 1).

Результаты вертикального распределения ¹⁴C в почвенном профиле показали, что для лесов Бескарагайского района максимальные значения зафиксированы в верхних слоях: в осиновом лесу на глубине 20 см – 330 Бк/кг; в сосновом лесу на глубине 10 см – 245 Бк/кг. В почвах, отобранных в лесах Бурабайского района, содержание ¹⁴C по всему профилю находится ниже предела обнаружения.

Высокие значения содержания ¹⁴C в почвах Бескарагайского района свидетельствуют о присутствии «бомбового» ¹⁴C, по сравнению с почвами Бурабай-

ского района. Хотя, если сравнивать сосновые леса двух районов, содержание органического вещества в почве Бурабайского района на порядок превышает его содержание в почве Бескарагайского района (таблица 1), при этом содержание ^{14}C в почве соснового леса Бурабайского района находится ниже предела обнаружения, в почве такого же леса Бескарагайского района достигает порядка 250 Бк/кг.

При отсутствии ^{14}C в почве лесов Бурабайского района (<6 Бк/кг), его содержание в лесной подстилке варьирует от 10–30 Бк/кг (в березовом лесу) до 50 Бк/кг (в сосновом лесу), что свидетельствует о поступлении ^{14}C из атмосферы (захват в виде $^{14}\text{CO}_2$ растениями в ходе фотосинтеза). Содержание ^{14}C в лесной подстилке лесов Бескарагайского района на уровне от 340 до 410 Бк/кг, что на порядок превышает содержание данного радионуклида в лесной подстилке лесов Бурабайского района, вероятно свидетельствует о двух источниках поступления ^{14}C как из атмосферы, так и из почвы.

Зафиксированные значения концентрации «бомбового» ^{14}C в поверхностных почвенных слоях показывают время оборота медленно циклирующего углерода. Следовательно, та часть почвенной среды, которая не успевает включаться в почвенный оборот, является потенциальным источником эмиссии углерода в атмосферу через микробальное разложение органической компоненты почвы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные исследования позволили установить особенности распределения ^{14}C в почвах лесных экосистем Казахстана. В почвах Бескарагайского района, расположенного в зоне радиоактивного следа от испытаний 1949 г., обнаружено значительное содержание «бомбового» ^{14}C , особенно в верхних слоях почвы и лесной подстилке, что свидетельствует о его поступлении как из атмосферы, так и из почвы. В отличие от этого, в почвах Бурабайского района содержание ^{14}C значительно ниже и, в основном, находится ниже предела обнаружения. Незначительное количество ^{14}C , обнаруженное в лесной подстилке, вероятно, связано с поглощением атмосферного $^{14}\text{CO}_2$ растениями в процессе фотосинтеза.

Различия в содержании ^{14}C в почвах двух районов, несмотря на большее содержание органического вещества в почвах Бурабайского района, подчеркивают влияние фактора радиоактивного загрязнения, связанного с испытаниями на СИП. Полученные данные о распределении «бомбового» ^{14}C в почвенных слоях Бескарагайского района позволяют оценить время оборота медленно циклирующего углерода и выявить потенциальные источники эмиссии углерода в атмосферу.

Данная работа выполнена в рамках программно-целевого финансирования Комитета науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан BR21881915 «Применение ядерных, сейс-

мических и инфразвуковых методов для оценки климатических изменений и смягчения последствий изменения климата.

ЛИТЕРАТУРА

1. Чичагова О.А., Зазовская Э.П. Радиоуглеродное датирование: прошлое, настоящее, будущее – развитие идей И.П. Герасимова // Бюллетень Почвенного института им. В.В. Докучаева. – 2015. – Вып. 81. – С. 160–176. – <https://doi.org/10.19047/0136-1694-2015-81-160-176>.
2. Larsen T., Yokoyama Yu., Fernandes R. Radiocarbon in ecology: Insights and perspectives from aquatic and terrestrial studies // *Methods in Ecology and Evolution*. – 2018. – Vol. 9. – P. 181–190. <https://doi.org/10.1111/2041-210X.12851>.
3. Boden, T. A., Marland, G., & Andres, R. J. Global, Regional, and National Fossil-Fuel CO₂ Emissions. Oak Ridge National Laboratory, US Department of Energy, 2013.
4. Zhou, W., Niu, Z., Wu, S., Xiong, X., Hou, Y., Wang, P., ... & Zhu, Y. Fossil fuel CO₂ traced by radiocarbon in fifteen Chinese cities. *Science of the Total Environment*. – 2020. – Vol. 729. – P. 138639.
5. Хохлова О.С., Зазовская Э.П., Чичагова О.А., Яблонский Л.Т. Радиоуглеродное датирование различных материалов из курганов ранних кочевников Южного Приуралья // *Известия Российской академии наук. Серия географическая*. – 2010. – № 3. – С. 82–94.
6. Hua Q., Barbetti M., Rokowski A.Z. Atmospheric radiocarbon for the period 1950–2010 / *Radiocarbon*. – 2013. – Vol. 55. – P. 2059–2072. https://doi.org/10.2458/azu_js_rc.v55i2.16177
7. Мыглан В.С. Методы датирования / Палеоклиматология: уч. пос. – Красноярск, 2007. – С. 12–18.
8. Trumbore S. Carbon respired by terrestrial ecosystems – recent progress and challenges / *Global Change Biology*. – 2006. – Vol. 12. – P. 141–153. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2006.01067.x>
9. Семипалатинский полигон. Ядерные испытания ССР. Обеспечение общей и радиационной безопасности при проведении ядерных испытаний. ФУ МЕДБИОЭКС-ТРЕМ Минздрав РФ. Под ред. Логачева В.А. – Москва, 1997 г., – 244 с.
10. Koarashi J., Atarashi-Andoh M., Nagano H. et.al. Practical Guide on Soil Sampling, Treatment, and Carbon Isotope Analysis for Carbon Cycle Studies / *JAEA-Technology 2020-012*. – JAEA, 2020. – 55 p. – <https://doi.org/10.11484/jaea-technology-2020-012>.
11. Сохранение лесов в Казахстане на благо людей. <https://www.undp.org/ru/kazakhstan/stories/sokhranenie-lesov-v-kazakhstane-na-bлаго-lyudey> (дата обращения 24.02.2025 г.).
12. Лесной фонд Казахстана. <https://www.gov.kz/memleket/entities/forest/activities/3811?lang=ru> (дата обращения 24.02.2025 г.).
13. Биоразнообразие. <https://newecodoklad.ecogofond.kz/2016/bioraznoobrazie/> (дата обращения 24.02.2025 г.).
14. Почвенная карта Семипалатинской области Казахской ССР. М. 1:300000/ Под ред. А.А. Соколова, М.К. Колходжаева, Н.И. Котина, К.Ш. Фаизова // *Ин-т почвоведения АН Каз. ССР Алма-Ата*, 1958.
15. Почвы Казахской ССР. Почвы Целиноградской области / В.В. Редков. Алма-Ата: Наука, 1964. – 325 с.

16. Методические рекомендации. Определение радиоуглерода в компонентах природной среды. Филиал «ИРБЭ» РГП НЯЦ РК, № 01-08/724 от 03.10.2022. – 14 с.
17. Раимканова А.М., Ляхова О.Н., Айдарханова А.К., Сержанова З.Б. Методические подходы и их применение к изучению радиоуглерода в почве площадки «Опытное поле» // Вестник НЯЦ РК. – 2021. – Вып. 4. – С. 3–9. <https://doi.org/10.52676/1729-7885-2021-4-3-9>
18. ISO 13162:2021: Water quality – Carbon 14 – Test Method Using Liquid Scintillation Counting (International Organization for Standardization, Geneva, 2021).
19. ГОСТ 26213-2021. Почвы. Методы определения органического вещества. – М.: Изд-во стандартов, 1985.– 12 с.
20. ГОСТ 12536-2014. Грунты. Методы лабораторного определения гранулометрического (зернового) и микроагрегатного состава. – М.: Стандартинформ, 2015.– 24 с.
21. ГОСТ 5180- 2015. Грунты. Методы лабораторного определения физических характеристик. – М.: Стандартинформ, 2016.– 19 с.
8. Trumbore S. Carbon respired by terrestrial ecosystems – recent progress and challenges // *Global Change Biology*. – 2006. – Vol. 12. – P. 141–153. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2006.01067.x>
9. Semipalatinskiy poligon. Yadernye ispytaniya SSR. Obespechenie obshchey i radiatsionnoy bezopasnosti pri provedenii yadernykh ispytaniy. FU MEDBIOEKSTREM Minzdrav RF. Pod red. Logacheva V.A. – Moscow, 1997 g., – 244 p.
10. Koarashi J., Atarashi-Andoh M., Nagano H. et.al. Practical Guide on Soil Sampling, Treatment, and Carbon Isotope Analysis for Carbon Cycle Studies / JAEA-Technology 2020-012. – JAEA, 2020. – 55 p. – <https://doi.org/10.11484/jaea-technology-2020-012>.
11. Sokhranenie lesov v Kazakhstane na blago lyudey. <https://www.undp.org/ru/kazakhstan/stories/sokhranenie-lesov-v-kazakhstane-na-bлаго-lyudey> (date of access 24.02.2025).
12. Lesnoy fond Kazakhstana. <https://www.gov.kz/memleket/entities/forest/activities/3811?lang=ru> (date of access 24.02.2025.).
13. Bioraznoobrazie. <https://newecodoklad.ecogofond.kz/2016/bioraznoobrazie/> (date of access 24.02.2025).
14. Pochvennaya karta Semipalatinskoy oblasti Kazakhskoy SSR. M. 1:300000/ Pod red. A.A. Sokolova, M.K. Kolkhodzhaeva, N.I. Kotina, K.Sh. Faizova // In-t pochvovedeniya AN Kaz. SSR Alma-Ata, 1958.
15. Pochvy Kazakhskoy SSR. Pochvy Tselinogradskoy oblasti / V.V. Redkov. Alma-Ata: Nauka, 1964. – 325 p.
16. Metodicheskie rekomendatsii. Opredelenie radiougleroda v komponentakh prirodnoy sredy. Branch “IRSE” RSE NNC RK, No. 01-08/724 from 03.10.2022. – 14 p.
17. Raimkanova A.M., Lyakhova O.N., Aidarkhanova A.K., Serzahnova Z.B. Methodological approaches and their use in studying radiocarbon in soil of the “Experimental Field» site // NNC RK Bulletin. – 2021. – Issue 4. – P. 3–9. (In Russ.) <https://doi.org/10.52676/1729-7885-2021-4-3-9>
18. ISO 13162:2021: Water quality – Carbon 14 – Test Method Using Liquid Scintillation Counting (International Organization for Standardization, Geneva, 2021).
19. ГОСТ 26213-2021. Почвы. Методы определения органического вещества. – Moscow.: Изд-во стандартов, 1985.– 12 p.
20. ГОСТ 12536-2014. Грунты. Методы лабораторного определения гранулометрического (зернового) и микроагрегатного состава. – Moscow: Standartinform, 2015.– 24 p.
21. ГОСТ 5180- 2015. Грунты. Методы лабораторного определения физических характеристик. – Moscow: Standartinform, 2016.– 19 p.

REFERENCES

1. Chichagova O.A., Zazovskaya E.P. Radiouglerodnoe datirovanie: proshloe, nastoyashchee, budushchee – razvitie idey I.P. Gerasimova // *Byulleten' Pochvennogo instituta im. V.V. Dokuchaeva*. – 2015. – Issue 81. – P. 160–176. – <https://doi.org/10.19047/0136-1694-2015-81-160-176>.
2. Larsen T., Yokoyama Yu., Fernandes R. Radiocarbon in ecology: Insights and perspectives from aquatic and terrestrial studies // *Methods in Ecology and Evolution*. – 2018. – Vol. 9. – P. 181–190. <https://doi.org/10.1111/2041-210X.12851>.
3. Boden, T. A., Marland, G., & Andres, R. J. Global, Regional, and National Fossil-Fuel CO₂ Emissions . Oak Ridge National Laboratory, US Department of Energy, 2013.
4. Zhou, W., Niu, Z., Wu, S., Xiong, X., Hou, Y., Wang, P., ... & Zhu, Y. Fossil fuel CO₂ traced by radiocarbon in fifteen Chinese cities. *Science of the Total Environment*. – 2020. – Vol. 729. – P. 138639.
5. Khokhlova O.S., Zazovskaya E.P., Chichagova O.A., Yablonskiy L.T. Radiouglerodnoe datirovanie razlichnykh materialov iz kurganov rannikh kochevnikov Yuzhnogo Priural'ya // *Izvestiya Rossiyskoy akademii nauk. Seriya geograficheskaya*. – 2010. – No. 3. – P. 82–94.
6. Hua Q., Barbetti M., Rokowski A.Z. Atmospheric radiocarbon for the period 1950–2010 / *Radiocarbon*. – 2013. – Vol. 55. – P. 2059–2072. https://doi.org/10.2458/azu_js_rc.v55i2.16177
7. Myglan V.S. *Metody datirovaniya / Paleoklimatologiya: uch. pos.* – Krasnoyarsk, 2007. – P. 12–18.

**ҚАЗАҚСТАН РЕСПУБЛИКАСЫНДАҒЫ ОРМАН ЭКОЖҮЙЕЛЕРІНІҢ
ТОПЫРАҒЫНДА РАДИОКӨМІРТЕКТИҢ ТАРАЛУЫН ЗЕРТТЕУ**

**А. К. Айдарханова, А. А. Сарсенова*, А. С. Мамырбаева,
Н. В. Ларионова, Ж. Е. Тлеуканова, А. О. Айдарханов**

ҚР ҰЯО РМК «Радиациялық қауіпсіздік және экология институты» филиалы, Курчатов, Қазақстан

** Байланыс үшін E-mail: aidanasarsenova@nnc.kz*

Бұл жұмыста Қазақстан Республикасының орман экожүйелерінің топырағында радиокөміртектің таралуы бойынша зерттеу ұсынылған. Зерттеу нысаны ретінде Абай облысы Бесқарағай ауданы мен Ақмола облысы Бурабай ауданының орман учаскелері таңдалды. Зерттеулер үшін сұйық сцинтилляциялық спектрометрия әдісімен ^{14}C құрамы анықталған орман төсемінің сынамалары және топырақ сынамаларын қабаттық іріктеу жүргізілді. Зерттеу нәтижелері Бесқарағай ауданының топырақтарында ^{14}C мөлшері жоғары екенін көрсетті, ол жоғарғы қабаттан төменгі қабатқа өткенде біртіндеп төмендейді. Бұл Семей сынақ полигонындағы сынақтардан туындаған радиоактивті ластануға байланысты. Бурабай ауданының топырақтарында ^{14}C мөлшері анықтау шегінен төмен.

***Түйінді сөздер:** радиокөміртек (^{14}C), сұйық сцинтилляциялық әдіс, топырақ, орман төсемі, Семей сынақ полигоны.*

**RESEARCH INTO THE DISTRIBUTION OF RADIOCARBON IN THE SOIL
OF FOREST ECOSYSTEMS OF THE REPUBLIC OF KAZAKHSTAN**

**A. K. Aidarkhanova, A. A. Sarsenova*, A. S. Mamyrbayeva,
N. V. Larionova, Zh. Ye. Tleukanova, A. O. Aidarkhanov**

Branch "Institute of Radiation Safety and Ecology" RSE NNC RK, Kurchatov, Kazakhstan

** E-mail for contacts: aidanasarsenova@nnc.kz*

This paper presents research into the distribution of radiocarbon in the soils of forest ecosystems of the Republic of Kazakhstan. The forest compartments of the Beskaragai area of the Abai region and the Burabai area of the Akmola region were selected as research objects. For research, samples of forest litter and soil were collected layerwise, in which the content of ^{14}C was determined by liquid scintillation spectrometry. The research findings showed that the soils of the Beskaragai area exhibit an elevated content of ^{14}C gradually decreasing from top to bottom. This is due to radioactive contamination caused by the tests conducted at the Semipalatinsk Test Site. The content of ^{14}C in the soils of the Burabai area is below the detection limit.

***Keywords:** radiocarbon (^{14}C), liquid scintillation technique, soil, forest litter, Semipalatinsk Test Site.*

<https://doi.org/10.52676/1729-7885-2025-1-175-178>
УДК 539.14

**PRELIMINARY RESULTS OF THE STUDY OF SHELL EFFECTS
IN MASS AND ENERGY DISTRIBUTIONS OF FISSION FRAGMENTS OF $^{241}\text{Am}^*$
IN $^{240}\text{Pu}(p,f)$ REACTION AT INCIDENT PROTON ENERGY OF 7 MeV**

A. N. Pan^{1,2*}, D. K. Alimov^{1,2}, K. V. Kovalchuk¹, N. Burtabayev^{1,2}, D. M. Janseitov^{1,2}, R. K. Kosherbayeva¹

¹ RSE "Institute of nuclear Physics" ME RK, Almaty, Kazakhstan

² Kazakh National University named after al-Farabi, Almaty, Kazakhstan

* E-mail for contacts: a.pan@inp.kz

Shell effects are most pronounced in mass and energy distributions of fission fragments at the lowest excitation energy of compound nucleus. To study shell effects the mass and energy distributions of fission fragments of $^{241}\text{Am}^*$ compound nucleus in $^{240}\text{Pu}(p,f)$ reaction were measured at incident proton energy of 7 MeV. This energy is substantially lower than coulomb barrier for this reaction leading to very small reaction cross-section and low speed of data acquisition. Due to that the results we provide are only preliminary and final results will be provided later after acquisition of additional statistics. The measurement was carried out by 2E method on U-150M accelerator of Institute of Nuclear Physics, Almaty city, Kazakhstan. The acquired preliminary mass and energy distributions were decomposed into yields of separate fission shells assuming that the shape of mass yield of each fission mode is gauss distribution.

Keywords: shell effects, fission fragments, plutonium-240, americium-241, fission fragments, fission mode.

INTRODUCTION

Low excitation energy of fissile compound nuclei allows for very pronounced shell effects in mass and energy distributions of fission fragments [1]. This allows for better study different nuclear shells and their effects on the process of fission. Studies aimed at energies deep below coulomb barrier are rare due to one of the main features of low excitation energy nuclear fission which is small cross-section due to low incident particle energy. Small cross-section is a serious obstacle to acquisition of high statistics experimental data. Unlike the reactions with neutrons, light charged particles allow to study very wide ranges of both nucleon composition and excitation energy of compound nuclei. As a part of series of studies of fission of actinide nuclei by light charged particles we present the preliminary results of measurements of mass and energy distributions of fission fragments of $^{241}\text{Am}^*$ compound nucleus in $^{240}\text{Pu}(p,f)$ reaction at incident proton energy of 7 MeV. The results are preliminary due to incident proton energy being around the half of coulomb barrier for this reaction (~ 13.6 MeV) leading to acquired statistic being only around 150 thousands events. $^{241}\text{Am}^*$ compound nucleus can hardly be studied by other types of nuclear reactions as it is itself radioactive or requires even more exotic target material like even more radioactive ^{240}Am for reactions with neutrons.

Besides shell effects the mass and energy distributions are also affected by the charged liquid droplet effects. Their combined influence is described by random rapture model [2]. According to it there are several fission modes that influence mass and energy distributions: fission mode S formed by charged liquid droplet effects and maximum mass yield at $A_{CN}/2$, asymmetric fission mode S1 formed by closed nuclear shells Z50 and N82, asymmetric fission mode S2 formed by deformed nuclear shell N88 and asymmetric fission mode S3 formed by

closed nuclear shell N50. Newer researches predict the presence of influence of additional deformed shell N84 and deformed shell Z52 [3, 4]. Said researches have given a new impulse to studies of deformed nuclear shells [5–9] which delve into theoretical calculations, experimental mass and gamma photon distributions. Since nuclear shells first and foremost are determined by energy of their formation it is most fitting to also study the energy distributions of fission fragments. The novelty of our research stems from experimental study of mass and total kinetic energy distributions of fission fragments together. To find influence of different deformed and spherical nuclear shells and to separate them from each other and liquid droplet effects new and more sensitive method of decomposition of mass and energy distributions into yields of separate fission modes was used [10]. The sensitivity of that method to smaller separate yields is increased due to usage of assumption of form of mass yield being gauss-like and due to inclusion of variance of average total kinetic energy of fission fragments into the analysis.

In this work we present preliminary results of the study of mass and energy of fission fragments of $^{241}\text{Am}^*$ compound nucleus in $^{240}\text{Pu}(p,f)$ reaction at incident proton energy of 7 MeV. Acquired preliminary mass and energy distributions of fission fragments were decomposed into yields of separate fission modes including additional deformed shells and assuming the shape of mass yield being gauss-like. Possible presence of deformed shells N84, Z52 [3] and, probably, deformed shell Z38 [11, 12] was found.

EXPERIMENTAL SETUP

The experiment was carried out at U-150M isochronous cyclotron of Institute of Nuclear Physics, Almaty City using Dinode experimental chamber. Proton beam energy was 7 MeV. The target was a layer of ^{240}Pu of

~ 50 mcg/cm² thickness on ~ 50 mcg/cm² thick aluminum backing. Methodology of the experiment was described in [10].

RESULTS OF THE MEASUREMENTS AND ANALYSIS OF EXPERIMENTAL DATA

Experimental results are presented on Figure 1 with black color. Measured mass yield $Y(m)$ is shown in linear and logarithm scales, both normalized at 200%. Average total kinetic energy of fission fragments $\langle \text{TKE} \rangle(m)$ is shown in linear scale. In mass and energy distributions it could be seen that the yield of asymmetric fission fragments is much higher than the yield of symmetric fission fragments. Due to low excitation energy of compound nuclei the shape of mass and energy distributions are mainly formed by shell effects. Peak of mass yield of fission fragments is at $M_H \approx 138$ a.m.u. Peak of average of total kinetic energy is at $M_H \approx 132$ a.m.u., which is corresponding to double magic ^{132}Sn nucleus.

Methodology of decomposition of mass and energy distributions into yields of separate fission modes and its advantages were described in [10].

The results of decomposition of mass and energy distributions are shown in Figure 1. For mass distribution in the area of S1 fission mode 3 gauss shapes have been used. For Z50 closed shell position of the peak of gauss was $M_H \approx 128.5$ a.m.u., amplitude was $A_{im} = 0.45\%$. For Z52 deformed shell position of the peak of gauss was $M_H \approx 132.5$ a.m.u., amplitude was $A_{im} = 0.7\%$. For N82 closed shell position of the peak was $M_H \approx 135.8$ a.m.u. and amplitude was $A_{im} = 0.55\%$. Widths of all abovementioned gaussians were equal and taken as $\sigma_{im}^2 = 3$ a.m.u., the basis of such approach was shown in [13]. For energy distributions, due to close proximity by mass of deformed nuclear shell Z52 and closed nuclear shell N82, they were described by the one shared distribution of average of total kinetic energy of fission fragments with peak value $\langle \text{TKE} \rangle_i \approx 190$ MeV. For Z50 closed nuclear shell separate distribution of average of total kinetic energy of fission fragments was used with peak value $\langle \text{TKE} \rangle_i \approx 177.5$ MeV. For all abovementioned shells coefficients of $b_i = 0$ were used. Deformed nuclear shell N88 (fission mode S2) by unchanged charge density hypothesis should have its peak around $M_H \approx 145.2$ a.m.u. for $^{241}\text{Am}^*$ nucleus, but in experimentally measured distribution position of the peak of heavy fragment is at $M_H \approx 137-138$ a.m.u. This position corresponds to deformed nuclear shell N84 in heavy fragment [3]. Due to it S2 fission mode was assumed to be a sum of two gaussians: 1) first one corresponding to deformed nuclear shell N84 [3] with position at $M_H = 139$ a.m.u., amplitude of $A_{im} = 3.8\%$ and width of $\sigma_{im}^2 = 6$ a.m.u.; 2) second one corresponding to deformed nuclear shell N88 with position at $M_H \approx 146$ a.m.u., amplitude of $A_{im} = 1.335\%$ and width of $\sigma_{im}^2 = 5.7$ a.m.u. Both deformed shells are described by the same distribution of average of total kinetic energies with peak value $\langle \text{TKE} \rangle_i \approx 181$ MeV, coefficient $b_i = 0.05$. Fission mode S3 was described by one gauss corresponding to N50 shell with position at

$M_L \approx 84$ a.m.u., amplitude of $A_{im} = 0.215\%$ and width of $\sigma_{im}^2 = 3.5$ a.m.u., distribution of average of total kinetic energies with peak value $\langle \text{TKE} \rangle_i \approx 188.2$ MeV, coefficient $b_i = 0$. Mode S which is formed by charged liquid droplet effects is described by one wide gauss with position at $M = 120.5$ a.m.u., amplitude of $A_{im} = 0.505\%$, and width of $\sigma_{im}^2 = 12.9$ a.m.u., distribution of average of total kinetic energies with peak value $\langle \text{TKE} \rangle_i \approx 168$ MeV, coefficient $b_i = 0$.

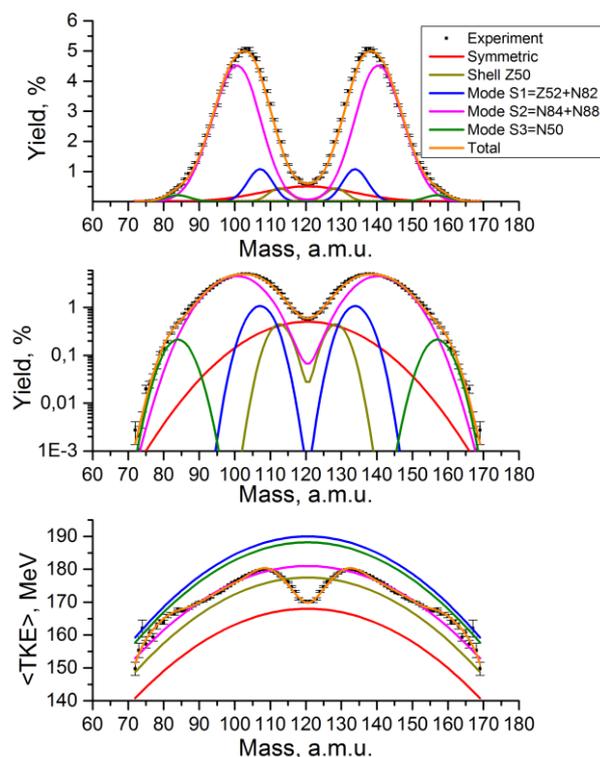


Figure 1. Experimentally measured mass and energy distributions of fission fragments of $^{241}\text{Am}^*$ compound nucleus formed in $^{240}\text{Pu}(p,f)$ reaction with incident proton energy of 7 MeV (black) and decomposition into yields of separate fission modes (in colors)

CONCLUSION

Measurements of mass and energy distributions of fission fragments of $^{241}\text{Am}^*$ compound nucleus formed in $^{240}\text{Pu}(p,f)$ reaction at incident proton energy of 7 MeV were conducted. Proton incident energy is almost 2 times lower than the coulomb barrier for said reaction. Acquired preliminary data was decomposed into yields of separate fission modes assuming the shape of mass yield of each mode to be gauss. That allowed seeing the presence of previously predicted deformed nuclear shells. In the future, after collecting additional statistics, the final results will be published.

Acknowledgments

The work was carried out with the support of the Ministry of Energy of the Republic of Kazakhstan, within the framework of the program BR23891530 «Development of complex scientific research in the field of nuclear and radiation physics based on Kazakhstan's accelerator complexes».

REFERENCES

1. K.B. Gikal et al., Proton induced fission of ^{232}Th at intermediate energies // *Physics of Atomic Nuclei*. – 2016. – Vol. 79, No. 9–10. – Pp. 1367–1374.
2. U. Brosa et al., Nuclear Scission // *Phys. Rep.* – 1990. – Vol. 197. – P. 167.
3. G. Scamps & C. Simenel, Impact of pear-shaped fission fragments on mass-asymmetric fission in actinides // *Nature*. – 2018. – Vol. 564. – P. 382.
4. G. Scamps & C. Simenel, Effect of shell structure on the fission of sub-lead nuclei // *Phys. Rev. C*. – 2019. – Vol. 100. – P. 041602(R).
5. E. Prasad et al., Systematics of the mass-asymmetric fission of excited nuclei from ^{176}Os to ^{206}Pb // *Phys. Lett. B*. – 2020. – Vol. 811. – P. 135941.
6. B. M. A. Swinton-Bland et al., Mass-asymmetric fission of $^{205,207,209}\text{Bi}$ at energies close to the fission barrier using proton bombardment of $^{204,206,208}\text{Pb}$ // *Phys. Rev. C*. – 2020. – Vol. 102. – P. 054611.
7. K. Nomura et al., Microscopic description of octupole collective excitations near $N = 56$ and $N = 88$ // *Phys. Rev. C*. – 2021. – Vol. 103. – P. 054301.
8. A. Chatillon et al., Influence of proton and neutron deformed shells on the asymmetric fission of thorium isotopes // *Phys. Rev. C*. – 2022. – Vol. 106. – P. 024618.
9. Shivani Jain et al., Investigation of octupole deformed fragments decaying from even-even isotopes of $^{222-230}\text{Th}$ // *Phys. Rev. C*. – 2022. – Vol. 105. – P. 034605.
10. A.N. Pan et al., Shell effects in the fission of $^{236}\text{U}^*$ nuclei, formed in the reaction $^{232}\text{Th}(\alpha,f)$ at incident alpha particle energy of 29 MeV // *NNC RK Bulletin*. – 2023. – Vol. 2. – P. 4–8. <https://doi.org/10.52676/1729-7885-2023-2-4-8>.
11. E.M. Kozulin et al., Fission of $^{180,182,183}\text{Hg}^*$ and $^{178}\text{Pt}^*$ nuclei at intermediate excitation energies // *Phys. Rev. C*. – 2022. – Vol. 105. – P. 014607.
12. A.A. Bogachev et al., Asymmetric and symmetric fission of excited nuclei of $^{180,190}\text{Hg}$ and $^{184,192,202}\text{Pb}$ formed in the reactions with ^{36}Ar and $^{40,48}\text{Ca}$ ions // *Phys. Rev. C*. – 2021. – Vol. 104. – P. 024623.
13. T. Banerjee et al., Search for possible fission modes at high excitation energies in ^{254}Fm // *Phys. Rev. C*. – 2022. – Vol. 105. – P. 044614.

ПРОТОНДАРДЫҢ 7 МЭВ ЭНЕРГИЯСЫНДА $^{240}\text{Pu}(p, f)$ РЕАКЦИЯСЫНДА АЛЫНҒАН $^{241}\text{Am}^*$ ҚҰРАМА ЯДРОСЫНЫҢ БӨЛІНУ ФРАГМЕНТТЕРІНІҢ МАССАЛЫҚ-ЭНЕРГЕТИКАЛЫҚ ТАРАЛУЫНДАҒЫ ҚАБЫҚША ӘСЕРЛЕРІН ЗЕРТТЕУДІҢ АЛДЫН АЛА НӘТИЖЕЛЕРІ

А. Н. Пан^{1,2*}, Д. К. Алимов^{1,2}, К. В. Ковальчук¹, Н. Буртебаев^{1,2}, Д. М. Джансенгов^{1,2}, Р. К. Кошербаева¹

¹ ҚР Энергетика министрлігі «Ядролық физика институты» РМК, Алматы, Қазақстан

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

* Байланыс үшін e-mail: a.pan@inp.kz

Қабықтың әсері бөлінетін құрама ядроның төмен қозу энергиялары кезінде бөліну фрагменттерінің массалық-энергетикалық таралуына айқын әсер етеді. Сондықтан қабық әсерлерінің әрекетін зерттеу үшін $^{240}\text{Pu}(p,f)$ реакциясында 7 МэВ атқыланатын протондардың энергиясымен алынған $^{241}\text{Am}^*$ ядросының бөліну фрагменттерінің массалық энергиясының таралуы өлшенді. Бұл энергия берілген реакция үшін кулондық тосқауылдан едәуір төмен, нәтижесінде реакция қимасы төмен және деректер жиынының жылдамдығы төмен болады. Осыған байланысты біз зерттеудің алдын-ала нәтижелерін ұсынамыз, қосымша статистиканы жинағаннан кейін қорытынды жасауға болады. Өлшеу Алматы қаласындағы Ядролық физика институтының У-150М үдеткішінде 2Е әдісімен жүргізілді. Алынған масса мен энергияның алдын-ала таралуы жеке қабықшалардың, соның ішінде деформацияланған қабықшалардың лобтарына ыдырайды, бұл қабық лобының пішіні Гаусс деп болжайды.

Түйін сөздер: қабықша әсерлері, ядроның бөлінуі, плутоний-240, Америций-241, бөліну фрагменттері, бөліну режимі.

**ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ОБОЛОЧЕЧНЫХ ЭФФЕКТОВ
В МАССОВО-ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ РАСПРЕДЕЛЕНИЯХ ОСКОЛКОВ ДЕЛЕНИЯ СОСТАВНОГО
ЯДРА $^{241}\text{Am}^*$, ПОЛУЧЕНОГО В РЕАКЦИИ $^{240}\text{Pu}(p,f)$ ПРИ ЭНЕРГИИ ПРОТОНОВ 7 МэВ**

А. Н. Пап^{1,2*}, Д. К. Алимов^{1,2}, К. В. Ковальчук¹, Н. Буртебаев^{1,2}, Д. М. Джансеитов^{1,2}, Р. К. Кошербаева¹

¹ РГП «Институт ядерной физики» МЭ РК, Алматы, Казахстан

² Казахский национальный университет имени аль-Фараби, Алматы, Казахстан

* E-mail для контактов: a.pap@inr.kz

Оболочечные эффекты оказывают наиболее выраженное влияние на массово-энергетические распределения осколков деления при низких энергиях возбуждения делящегося составного ядра. Поэтому для исследования поведения оболочечных эффектов было измерено массово-энергетическое распределение осколков деления ядра $^{241}\text{Am}^*$, полученного в реакции $^{240}\text{Pu}(p,f)$ при энергии налетающих протонов 7 МэВ. Эта энергия значительно ниже кулоновского барьера для данной реакции, что ведет к низкому сечению реакции и малой скорости набора данных. Ввиду этого мы представляем предварительные результаты исследования, после набора дополнительной статистики возможно будет сделать окончательные выводы. Измерение проводилось методом 2E на ускорителе У-150М Института ядерной физики, г. Алматы. Полученное предварительное массово-энергетическое распределение было разложено по вкладам отдельных оболочек, включая деформированные оболочки, предполагая, что форма вклада оболочки представляет собой гаусс.

Ключевые слова: оболочечные эффекты, деление ядра, плутоний-240, америций-241, осколки деления, мода деления.

<https://doi.org/10.52676/1729-7885-2025-1-179>

**Исправление к статье
«ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СТАБИЛИЗИРУЮЩИХ ДОБАВОК ДЛЯ НАПРАВЛЕННОЙ МОДИФИКАЦИИ
И УПРОЧНЕНИЯ Nd₂Zr₂O₇ КЕРАМИК»**

А. Л. Козловский, М. Б. Кабиев, И. Е. Кенжина, А. У. Толенова

Вестник НЯЦ РК. 2024; 4(100):119–127

На стр. 125 в конце раздела «Заключение» необходимо добавить следующий абзац текста:
«Исследование финансируется Комитетом науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан (No. BR21882237).»

Оригинальная статья может быть найдена по ссылке <https://doi.org/10.52676/1729-7885-2024-4-119-127>.

**Мақаланы түзету
«Nd₂Zr₂O₇ КЕРАМИКАСЫН БАҒЫТТАЛҒАН МОДИФИКАЦИЯЛАУ ЖӘНЕ БЕРІКТЕНДІРУ
ҮШІН ТҰРАҚТАНДЫРУШЫ ҚОСПАЛАРДЫ ҚОЛДАНУ»**

А. Л. Козловский, М. Б. Кабиев, И. Е. Кенжина, А. У. Толенова

ҚР ҰЯО жаршысы. 2024; 4(100):119–127

125-беттегі «Қорытынды» бөлімінің соңына келесі мәтін абзацын қосу керек:
«Исследование финансируется Комитетом науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан (No. BR21882237).»

Түпнұсқа мақаланы <https://doi.org/10.52676/1729-7885-2024-4-119-127> сілтемесі арқылы табуға болады.

**Erratum to:
« USE OF STABILIZING ADDITIVES FOR TARGETED MODIFICATION AND HARDENING
OF Nd₂Zr₂O₇ CERAMICS »**

A. L. Kozlovskiy, M. B. Kabiyeu, I. E. Kenzhina, A. U. Tolenoa

NNC RK Bulletin. 2024; 4(100):119–127

On page 125, at the end of the “Conclusion” section, the following paragraph of text should be added:
“ Исследование финансируется Комитетом науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан (No. BR21882237). ”

The original article can be found at <https://doi.org/10.52676/1729-7885-2024-4-119-127>.

СПИСОК АВТОРОВ

- Абуова А. У., 90, 140
Абуова Ф. У., 90, 140
Азамбаев С. Б., 121
Айдарбеков Н. К., 148
Айдарханов А. О., 5, 167
Айдарханова А. К., 167
Ақан Ә., 28
Алдаберген І. Е., 12
Алибай Т. Т., 96
Алимов Д. К., 175
Ахмеди Т. Д., 64
Базарбек А. Б., 90
Бакланов В. В., 104
Бакланова Ю. Ю., 104
Бекмырза К. Ж., 148
Букина О. С., 104
Буртебаев Н., 175
Великанов А. Е., 72
Витюк Г. А., 46
Гиниятова Ш. Г., 132
Джансеитов Д. М., 175
Елекеев Е. М., 161
Әбдімомын С. К., 38
Әбдірашев Ә. К., 28, 90
Әнуар Ғ. А., 28
Жанболатов О. М., 46
Жанболатова Ғ. Қ., 21
Жанылысов К. Б., 96
Жумадилова Ж., 148
Жумадилова У. А., 80
Зәкиева Ж. Е., 90, 140
Инербаев Т. М., 90, 140
Исағали Ә. А., 72
Кабдрахимова Г. Д., 90
Кабиев М. Б., 179
Кабышев А. М., 148
Кайнарбай А. Ж., 96
Калманова Д. М., 28
Каптагай Г. А., 140
Кенжина И. Е., 179
Кенжина М. Е., 121
Ковальчук К. В., 175
Козловский А. Л., 113, 121, 132, 179
Кошербаева Р. К., 175
Коянбаев Е. Т., 38
Кривицкий П. Е., 5
Кубенова М. М., 148
Кундузбаева А. Е., 5
Кутербеков К. А., 148
Қабдылқақов Е. А., 46
Қайырбекова Ә. Ж., 21
Ларионова Н. В., 5, 167
Мальчик Ф. И., 38
Мамырбаева А. С., 167
Медетбеков Б. С., 80
Мерәлі Н. А., 90
Мәлік С. Д., 38
Миниязов А. Ж., 21, 38, 64
Михайлова Н. Н., 53
Молдамурат Х., 28
Мухамедиев А. К., 80
Мухамедова Н. М., 64
Нурахметов Т. Н., 96
Нуркенов С. А., 140
Нурпеисов А. С., 96
Опахай С., 148
Оспанова Ж. Н., 64
Өкен О., 64
Пан А. Н., 175
Полевик В. В., 5
Полипкина Е. Н., 155
Попов Ю. А., 80
Прозоров А. А., 80
Прозорова И. В., 80
Сабитова Р. Р., 80
Сабыртаева А. А., 64
Садыкова Б. М., 96
Салиходжа Ж. М., 96
Сарсенова А. А., 167
Светачев С. Н., 80
Секен Д. М., 46
Сембаева Г. Н., 12
Скаков М. К., 38
Соколов И. А., 21
Солтанбек Н. С., 90
Степанов Б. П., 161
Сураев А. С., 46
Сысоева Е. С., 155
Тлеуканова Ж. Е., 167
Толеген У. Ж., 140
Толенова А. У., 121, 179
Топорова А. В., 5
Туленбергенов Т. Р., 21
Умирова Г. К., 72
Шайкиева К. С., 64
Шамиева Р. К., 96
Шлимас Д. И., 132
Шокпарбай А. Е., 53

ТРЕБОВАНИЯ К ОФОРМЛЕНИЮ СТАТЕЙ

Статьи для публикации в журнале отправляются авторами после регистрации на веб-сайте журнала в электронном виде в формате MS WORD (.docx), а после принятия решения о публикации статьи редакцией (по окончании процесса проверки и рецензирования) – и в виде печатной копии окончательной редакции статьи с согласием авторов на публикацию и их подписями (по почте, курьером и пр. в адрес редакции).

Текст печатается на листах формата А4 (210×297 мм) с полями: сверху 30 мм; снизу 30 мм; слева 20 мм; справа 20 мм, на принтере с высоким разрешением (600–2400 dpi). Горизонтальное расположение листов не допускается.

Используйте шрифт Times New Roman высотой 10 пунктов. Пожалуйста, используйте встроенные стили заголовков (Заголовков 1, 2...) только для названия статьи и заголовков подразделов, и не используйте их для обычного текста, таблиц и подрисованных подписей.

В левом верхнем углу первой страницы должен быть указан индекс УДК. Название статьи печатается ниже заглавными буквами, в одном абзаце. После этого печатается текст краткой аннотации на языке статьи (100–3000 символов), и отдельной строкой (после фразы Ключевые слова:) – ключевые слова (5–10). Далее, со следующего абзаца – основной текст, содержащий разделы: Введение, Основную часть и Результаты (возможно, с подразделами), Заключение. После текста статьи приводится список литературы (на языках оригиналов) и блоки «название статьи, аннотация, ключевые слова» на двух оставшихся языках.

Обратите внимание, что ФИО авторов и представляемые организации в статье указывать не нужно, т.к. статьи проходят двойное «слепое» рецензирование. Эту информацию необходимо будет заполнить на трех языках (русском, казахском, английском) в форме на веб-сайте при подаче статьи. Рекомендуем заранее подготовить ее в виде отдельного документа с таблицами по образцу (см. ОБРАЗЕЦ на следующей странице) и приложить к статье.

Для текста статьи используйте одинарный межстрочный интервал, между абзацами не нужно вставлять пустые абзацы и строки.

Не используйте таблицы для расположения иллюстраций и подрисованных подписей, а также средства рисования MS Word поверх иллюстраций.

Максимально допустимый объем статьи – 10 страниц.

При написании статей необходимо придерживаться следующих требований:

- Окончательная редакция статьи, прошедшая рецензирование и допущенная к публикации, должна содержать блоки на трех языках – казахском, английском и русском, с указанием названия статьи, фамилий, имен, отчеств авторов, полного названия организаций, городов и стран местонахождения, которые они представляют, аннотации (объемом 100–3000 символов, включая знаки препинания и пробелы), и ключевых слов (5–10).
- Ссылки на литературные источники даются в тексте статьи цифрами в квадратных [...] скобках по мере упоминания. Список литературы приводится по ГОСТ 7.1-2003.
- Пожалуйста, не используйте механизм автоматической нумерации (поля) MS Word для нумерации ссылок на литературу, списков, рисунков и таблиц – используйте обычный текст;
- Иллюстрации (графики, схемы, диаграммы) должны быть выполнены на компьютере (ширина рисунка 8 или 14 см). Особое внимание обратите на надписи на рисунке – они должны быть различимы при уменьшении до указанных выше размеров. Файлы рисунков должны быть представлены отдельно в одном из растровых – .tif, .png (для схем и рисунков с надписями), .jpg (для фото) с разрешением 300 dpi (~1000 px для рисунков шириной 8 см и ~1800 px для рисунков шириной 14 см) или векторных – .svg, .wmf, .emf форматах. Названия файлов должны соответствовать положению в статье (напр. Рисунок 1-a.tif). Для надписей на рисунках предпочтительно использовать шрифт Arial Narrow или аналогичный (узкий шрифт без засечек).
- Математические формулы в тексте должны быть набраны как уравнения MS Word или формулы MathType. Следует нумеровать лишь те формулы, на которые имеются ссылки в тексте.
- Текст должен быть тщательным образом выверен и отредактирован. Бумажная версия статьи должна быть в конце подписана авторами.

К статье прилагаются следующие документы:

- 1) *Сопроводительное письмо от авторов*, в котором должны содержаться сведения о том, что статья может быть опубликована в открытой печати, ранее не была опубликована, не находится на рассмотрении на предмет публикации в других изданиях, статья не содержит информации, способной привести к конфликту интересов.
- 2) *Файлы рисунков*.

Название статьи, аннотация, ключевые слова, а также сведения обо всех авторах статьи заполняются на 3-х языках (русском, казахском, английском) в форме на сайте при подаче статьи (эту информацию также желательно приложить к статье в виде отдельного файла – см. ОБРАЗЕЦ на следующей странице).

Дополнительную актуальную информацию по оформлению, подготовке статей, авторским правам, регистрации можно получить на веб-сайте журнала в разделе **Правила для авторов** (<https://journals.nnc.kz/jour/about/submissions>).

Статьи, оформление которых не соответствует указанным требованиям, к публикации не допускаются.

ОБРАЗЕЦ

Название статьи (на русском языке)

Таблица 1. Авторы (на русском языке)

Порядковый номер автора статьи	Фамилия	Имя полностью	Отчество полностью (если имеется)	Должность	Ученая степень	Телефон (без скобок, пробелов и дефисов)	Электронная почта	Номера организаций, которые представляет автор (из таблицы 2)
1	Иванов	Иван	Иванович	доцент	PhD	+57771114455	my_mail@mail.ru	1, 2
2	Петров	Петр	Петрович	зав. лаб.	к.ф.-м.н.	+69992223366	my_mail@google.com	1

Таблица 2. Организации (на русском языке)

Порядковый номер организации	Наименование	Полный почтовый адрес (индекс, страна, город, улица, дом)	Официальный веб-сайт (если имеется)
1	Евразийский национальный университет им. Л. Н. Гумилева	010008, Республика Казахстан, г. Нур-Султан, ул. Сатпаева, 2	www.enu.kz
2	Астанинский филиал Института ядерной физики МЭ РК	010008, Республика Казахстан, г. Нур-Султан, пр. Абылай хана, 2/1	www.inp.kz

Название статьи (на казахском языке)

Таблица 1. Авторы (на казахском языке)

Мақала авторының реттік нөмірі	Тегі	Толық аты	Әкесінің толық аты (болса)	Лауазымы	Ғылыми дәрежесі	Телефоны (жақшасыз, бос орынсыз және дефиссіз)	Электрондық пошталасы	Автор ұйымдарының нөмірлері (2-кестеден)
1	Иванов	Иван	Иванович	доцент	PhD	+57771114455	my_mail@mail.ru	1, 2
2	Петров	Петр	Петрович	зертхана менеджері	ф.-м.ғ.к.	+69992223366	my_mail@google.com	1

Таблица 2. Организации (на казахском языке)

Ұйымның реттік нөмірі	Атауы	Толық пошталық мекенжайы (индекс, ел, қала, көше, үй)	Ресми веб-сайт (болса)
1	Л. Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті	010008, Қазақстан Республикасы, Нұр-Сұлтан қ., Сәтпаев көшесі, 2	www.enu.kz
2	ҚР ЭМ Ядролық физика институтының Астана филиалы	010008, Қазақстан Республикасы, Нұр-Сұлтан қ., Абылай хан даңғылы, 2/1	www.inp.kz

Название статьи (на английском языке)

Таблица 1. Авторы (на английском языке)

Order number of author's article	Surname	Full Name	Full Middle Name (if any)	Position	Academic degree	Telephone (free of brackets, gaps and hyphens)	E-mail	Numbers of organizations representing by author (from Table 2)
1	Ivanov	Ivan	Ivanovich	Associate professor	PhD	+57771114455	my_mail@mail.ru	1, 2
2	Petrov	Peter	Petrovich	Chief of laboratory	Cand. of Phys. and Math. Sc.	+69992223366	my_mail@google.com	1

Таблица 2. Организации (на английском языке)

Order number of organization	Title	Full post address (zip code, country, city, street, house)	Official web-site (if any)
1	L.N. Eurasian National University	010008, Republic of Kazakhstan, Nur-Sultan, Satpaev st. 2	www.enu.kz
2	Astana Branch of the Institute of Nuclear Physics ME RK	010008, Republic of Kazakhstan, Nur-Sultan, ave. Abylai Khan, 2/1	www.inp.kz

Примечание: если информация отсутствует – оставляйте соответствующие ячейки таблицы пустыми.

Ответственный секретарь к.ф.-м.н. В.А. Витюк
тел. +7 (722-51) 3-33-35, E-mail: VITYUK@NNC.KZ

Технический редактор И.Г. Перепелкин
тел. +7 (722-51) 3-33-33, E-mail: IGOR@NNC.KZ

Адрес редакции: 180010, Казахстан, г. Курчатов, ул. Бейбіт атом, 2Б
<https://journals.nnc.kz/jour>

© Редакция журнала «Вестник НЯЦ РК», 2025

Свидетельство о постановке на учет №17039-Ж от 13.04.2018 г.
Выдано Комитетом информации Министерства информации и коммуникаций Республики Казахстан

Тираж 300 экз.

Выпуск набран и отпечатан в типографии
Национального ядерного центра Республики Казахстан
071100, Казахстан, г. Курчатов, ул. Бейбіт атом, 2Б

