







# Вестник НЯЦ РК

ПЕРИОДИЧЕСКИЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ НАЦИОНАЛЬНОГО ЯДЕРНОГО ЦЕНТРА РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН

ВЫПУСК 1(93), МАРТ 2023

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(93) ШЫҒАРЫМ, НАУРЫЗ, 2023 ЖЫЛ

# NNC RK Bulletin

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

ISSUE 1(93), March 2023

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

ПРИМЕНЕНИЕ ТЕХНОЛОГИИ HVOF ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ ИЗНОСОСТОЙКИХ ПОКРЫТИЙ На основе WC – обзор	
Б.К. Рахадилов, Н. Муктанова, Л.Г. Журерова	4
АЛТАЙ ЖОТАСЫНДАҒЫ ТУРИЗМ ӘСЕРІНЕН ТОПЫРАҚТЫҢ АУЫР МЕТАЛМЕН ЛАСТАНУЫ	
Е.Б. Баделгажы, Б.А. Капсалямов, Ж.Б. Тусупова	15
<b>OVERVIEW OF THE HIGH-ENTROPY ALLOYS CONCEPT</b> Ye.Ye. Kambarov, G.K. Uazyrkhanova, M. Rutkowska-Gorczyca, A.Ye. Kussainov	25
РАЗРАБОТКА ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ДЛЯ ПОДСИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ НАГРЕВАТЕЛЯМИ И ПОДСИСТЕМЫ КОНТРОЛЯ ПАРАМЕТРОВ ЖИДКОГО НАТРИЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО СТЕНДА EAGLE С.А. Ильиных, А.В. Сысалетин, В.А. Ермаков, А.Б. Азбергенова, Р.Ж. Наурызбаев, Р.С. Исламов	40
ТОҢАЗЫТҚЫШТЫҢ АҚАУ ЖАҒДАЙЫНДА ЖҰМЫС ІСТЕУ ПРИНЦИПІ Д.Н. Нургалиев, М.В. Ермоленко, О.А. Степанова, А.Е. Сатыбалдинова	
ОЦЕНКА ДОЗОВЫХ НАГРУЗОК ДЛЯ РАЗЛИЧНЫХ ПОВЕДЕНЧЕСКИХ СЦЕНАРИЕВ НА ТЕРРИТОРИИ «АТОМНОГО ОЗЕРА» С.Б. Субботин, А.О. Айдарханов, Е.В. Романенко, А.В. Топорова, В.И. Супрунов, М.Р. Актаев	
РЕЗУЛЬТАТЫ ВНЕДРЕНИЯ НОВОЙ ТЕХНОЛОГИИ ОЦИФРОВКИ ИСТОРИЧЕСКИХ СЕЙСМОГРАММ В ЦЕНТРЕ ДАННЫХ П.В. Рябенко. И.Н. Соколова	61
ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ФАЗООБРАЗОВАНИЯ В КОМПОЗИТНЫХ Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> КЕРАМИКАХ ПРИ ВАРИАЦИИ ТЕМПЕРАТУРЫ СПЕКАНИЯ Д.Б. Боргеков, А.Л. Козловский	
СИСТЕМА ОПТИЧЕСКОЙ ДИАГНОСТИКИ НА УСКОРИТЕЛЕ INURA М.И. Кайканов, Д.К. Наурузбаев, А.В. Тихонов, М.У. Хасенов	77
РАСЧЕТНЫЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ДАННЫЕ О ПРОФИЛЕ ЭНЕРГОВЫДЕЛЕНИЯ В ТВС РЕАКТОРА ИВГ.1М ПОСЛЕ СНИЖЕНИЯ ОБОГАЩЕНИЯ ТОПЛИВА Р.Р. Сабитова, Ю.А. Попов, Р.А. Иркимбеков, И.В. Прозорова, С.В. Беденко	
<b>ИЗУЧЕНИЕ РАСТИТЕЛЬНОГО ПОКРОВА И СОДЕРЖАНИЯ В НЕМ ТРИТИЯ НА ОБЪЕКТЕ</b> «ЛАЗУРИТ» СЕМИПАЛАТИНСКОГО ИСПЫТАТЕЛЬНОГО ПОЛИГОНА Н.В. Ларионова, П.Е. Кривицкий, Б.М. Султанова, В.В. Полевик, Л.В. Тимонова, С.Б. Субботин, Л.Ф. Субботина, М.Т. Абишева, В.Н. Монаенко, А.В. Топорова, А.О. Айдарханов	
<b>ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА ЖИДКОСТНОЙ СЦИНТИЛЛЯЦИИ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ</b> <b>СУММАРНОЙ АЛЬФА-, БЕТА-АКТИВНОСТИ В ВОДЕ</b> К.Т. Мустафина, Ф.Ф. Жамалдинов, Е.В. Романенко, Е.З. Шакенов, А.И. Меркель, С.Е. Сальменбаев	97
СПИСОК АВТОРОВ	104

# ПРИМЕНЕНИЕ ТЕХНОЛОГИИ HVOF ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ ИЗНОСОСТОЙКИХ ПОКРЫТИЙ НА ОСНОВЕ WC – ОБЗОР

#### Б.К. Рахадилов<sup>1</sup>), Н. Муктанова<sup>2</sup>), Л.Г. Журерова<sup>1</sup>)

<sup>1)</sup> Восточно-Казахстанский университет им. С. Аманжолова, Усть-Каменогорск, Казахстан <sup>2)</sup> Восточно-Казахстанский технический университет им. Д. Серикбаева, Усть-Каменогорск, Казахстан

E-mail для контактов: rakhadilovb@mail.ru

В статье приведены основные проблемы износа и срока эксплуатации шиберных задвижек для магистрального трубопроводного транспорта нефтяной и газовой промышленности. Одним из возможных способов решения этих проблем является нанесение тонкого слоя износостойких и коррозионностойких покрытий. В связи с постоянно растущей стоимостью материалов, а также возросшими требованиями к материалам в последнее время все большее значение придается методам нанесения покрытий. Среди газотермических методов нанесения покрытий технология высокоскоростного кислородно-топливного напыления (HVOF) является новой и быстро развивающейся технологией, которая позволяет получать покрытия высокой плотности с пористостью менее 1%, обладающие повышенной твердостью и адгезией, а также улучшенными свойствами эрозии, коррозии и износостойкости. В этой обзорной статье проведен сравнительный обзор характеристик карбидных покрытий, полученных с использованием различных технологий напыления.

**Ключевые слова:** WC-Co-Cr покрытия, технология HVOF, износостойкость, адгезия, коррозионная стойкость, термическое напыление.

#### 1. Введение

Одной из главных технических задач транспортировки нефти и нефтепродуктов является создание высокоорганизованной системы коммуникаций трубопроводного транспорта, обеспечивающего высокую надежность и полную экологическую безопасность. Это можно обеспечить созданием и изготовлением качественной трубопроводной арматуры и других элементов системы трубопроводного транспорта применением высокопрочных и износостойких материалов.

В Республике Казахстан производством трубопроводной арматуры занимаются крупные заводы, такие как: акционерное общество «Усть-Каменогорский арматурный завод» (город Усть-Каменогорск), товарищество с ограниченной ответственностью «Завод Казахстанская Арматура» (город Темиртау), акционерное общество «Усть-Каменогорский завод промышленной арматуры» (город Усть-Каменогорск), товарищество с ограниченной ответственностью «Павлодарский завод трубопроводной арматуры» (город Павлодар), Атырауский завод трубопроводной арматуры (город Атырау). Потребителями выпускаемых в Республике Казахстан трубопроводной арматуры, в том числе задвижек (шиберные, клиновые и затворы обратные), являются крупнейшие энергодобывающие, нефтеперерабатывающие и металлургические предприятия Республики Казахстан и Содружества Независимых Государств [1].

Одной из технических задач вышеуказанных заводов является повышение надежности и долговечности шиберных задвижек. Задвижки являются одним из важных элементов в транспортировке нефти и газа, в процессе добычи от скважины и по сложной сети трубопроводов, определяя условия безопасной эксплуатации и защиты окружающей среды.

Интенсификация производства и повышение конкурентоспособности отечественных изделий требует применения современных материалов, обладающих улучшенными физико-химическими свойствами. Однако, отечественные заводы по производству трубопроводной арматуры, а именно шиберных задвижек, все еще применяют традиционные и устаревшие технологии наплавки и нанесение покрытий, которые не обеспечивают высокие трибологические и коррозионные характеристики узла затвор-седло.

Например, Усть-Каменогорский арматурный завод применяет технологию электродуговой наплавки дисперсионно-твердеющей сталью типа 10Х17Н87С5Г2Т уплотнительных поверхностей деталей затвора тяжелой сварной нефтяной трубопроводной арматуры. Однако, данный метод не обеспечивает высоких механических и трибологических характеристик поверхности. Поэтому, в условиях Усть-Каменогорского арматурного завода для повышения износостойкости наплавленного материала ИЗ 10Х17Н8С5Г2Т применяется ультразвуковая упрочняющая финишная обработка, которая позволяет одновременно повысить поверхностную твердость наплавленного металла, класс шероховатости поверхностей и создать антифрикционный поверхностный слой. Тем не менее, и данная комбинированная технология не обеспечивает срок службы шиберных задвижек на уровне импортных и является экономически нецелесообразной. Поэтому данный завод в настоящее время широко применяет для повышения срока службы шиберных задвижек технологию гальванического хромирования, которая является экологический вредной. В развитых странах сегодня существуют жесткие ограничения на процессы с эмиссией шестивалентного хрома [2].

А другие заводы Казахстана все еще не освоили и не внедрили технологии наплавки или напыления при производстве деталей шиберных задвижек. Например, АО «Усть-Каменогорский завод промышленной арматуры» производит малогабаритные шиберные задвижки без применения поверхностной обработки (наплавка или напыление), что делает их менее конкурентоспособными по сравнению с импортными продукциями [3].

Как известно из работ С.С. Полоскова, С.А. Тукова, М.В. Корчагина, С.О. Киреева [4-5], в процессе эксплуатации компоненты арматуры, используемой в нефтяной промышленности, подвергаются интенсивному эрозионному и коррозионному износу, что приводит к резкому снижению их долговечности. Эрозия и коррозия задвижек, используемых в нефтедобывающей промышленности, является серьезной проблемой. Это связано с тем, что взвешенные частицы песка в потоке нефти и газа вызывают эрозию некоторых критических компонентов, таких как задвижки и седловые кольца, что приводит к значительным эксплуатационным расходам. С другой стороны, коррозия этих компонентов из-за хлоридов, сульфилов и других примесей в сырой нефти и газе также может привести к утечкам и преждевременным отказам. Чтобы противостоять сочетанию трения и износа, на затворах и седлах используются различные покрытия и способы обработки поверхности. Они включают твердое хромирование, электролитическое никелирование, конверсионные покрытия, диффузионную обработку, термическое напыление покрытий и наплавку сварных швов. Среди них термическое напыление является одним из наиболее эффективных методов с точки зрения мировой практики и современным аналогом вышеизложенных методов [6].

Согласно источникам [7-9] установлено, что с помощью различных методов термического напыления, таких как воздушно-плазменное напыление (APS), вакуумное плазменное напыление (VPS), детонационный пистолет, дуговое напыление, пламенное напыление и высокоскоростное кислородное напыление (HVOF) наносятся в основном покрытия на основе керамико-металлического композита (керметы), в частности карбид-вольфрам-кобальт WC-Co, карбид-вольфрам-кобальт-хром WC-Co-Cr, а также хром-карбид-никель-хром Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>-NiCr [10-13]. Однако процесс HVOF получил признание за свои преимущества, включая меньшую пористость, уменьшение реакций разложения, более высокую степень сохранения карбида вольфрама (WC), и лучшую адгезию между карбидом вольфрама (WC) и металлической связующей фазой [14-20].

В мире существует не более десятка компаний, изготавливающих промышленные горелки для

НVOF. Одной из них является ООО «ИндМет», базирующаяся в г. Санкт-Петербург (Российская Федерация). Одним из приоритетных направлений ее деятельности является выполнение выездных работ на территории заказчика по восстановлению или изменению геометрии изношенных поверхностей с помощью метода Kermetico HVOF. Преимущество этого метода заключается в его компактности и способности свободно транспортироваться в нужное место. Такое преимущество символизирует его современное состояние [21].

Установку HVOF Termika-3 производит научнопроизводственная фирма «Плазмацентр» (г. Санкт-Петербург, Российская Федерация). Современная аппаратная база фирмы достаточно обширна, она выпускает не только HVOF Termika-3 для напыления, но и большое количество оборудования для плазменной сварки, наплавки, закалки и упрочнения. В настоящее время в Казахстане существует только одна научно-производственная фирма, использующая технологию HVOF Termika-3 и являющаяся официальным дистрибьютором научной производственной фирмы «Плазмацентр», это TOO «PlasmaScience» [22, 23]. В дальнейшем на этой базе будут выполняться все исследовательские работы авторов, связанные с технологией HVOF. Преимуществом данной технологии HVOF Termika-3 перед другими аналогами является свободная транспортировка в нужное место, наличие специальных сменных горелок для напыления внутренних и наружных поверхностей, простота принципа работы технологии (см. раздел 2), хорошие характеристики напыляемого покрытия

Существует несколько аппаратурных баз нанесения покрытий методом HVOF. Например:

 компания ООО «Servis Armatur» (Чешская Республика) использует технологию, состоящую из американской системы HP/HVOF JP-5000, которая позволяет очень точно напылять цилиндрические и шарообразные поверхности [24];

компания ООО «Сабарос» (г. Москва, Российская Федерация) производит технологию, состоящую из Нидерландской системы HP/HVOF JP-5000, JetKote, Diamond Jet, FX-5, которая создает покрытия с высокой адгезией и позволяет напылять очень толстые покрытия [25].

Все виды технологии HVOF в вышеуказанных компаниях используют единый принцип создания сверхзвуковых течений газового пламени и имеют только конструктивные особенности, в основном, связанные с получением разной скорости и температуры газопорошковой смеси, условиями охлаждения, отличающиеся производительностью напыления. Технология HVOF в основном напыляет материалы, на основе карбидов, обладающих высокими эксплуатационными характеристиками, такие как высокая стойкость к абразивному, эрозионному и кавитационному износу [26–28]. Благодаря таким характеристикам карбидосодержающие композиты хорошо зарекомендовали себя как износо- и эрозионно-стойкие покрытия во многих отраслях промышленности, таких как аэрокосмическая и морская (шасси самолетов, пропеллеры, газовые турбины, гидравлические приводы), бурение нефтяных и газовых скважин, резка металла, горнодобывающая промышленность, обработка металлов давлением, целлюлозно-бумажная промышленность, геотермальная энергетика, производство электроэнергии (газовые турбины) и морские сооружения [29–31].

Таким образом, целью настоящей обзорной статьи является анализ исследований ученых в области нанесения защитных или комбинированных порошковых покрытий на шиберные задвижки с использованием метода напыления HVOF для улучшения физико-механических и трибологических характеристик поверхности материала.

### 2. ПРОГРЕСС В ИЗУЧЕНИИ СВОЙСТВ ПОКРЫТИЙ НА ОСНОВЕ КАРБИДА ВОЛЬФРАМА, НАПЫЛЕН-НЫХ МЕТОДОМ **HVOF** И СРАВНЕНИЯ ИХ С ДРУ-ГИМИ МЕТОДАМИ

# 2.1 Механические и физические характеристики покрытий

В области обработки поверхностей, термическое напыление является хорошо известным методом, используемым для нанесения различных типов защитных покрытий, которые используются во многих отраслях промышленности [32]. В зависимости от области применения могут быть выбраны различные способы изготовления покрытия: пламя, дуга, плазма или холодное напыление [10, 33-36]. Среди них высокоскоростное кислородно-топливное напыление (HVOF) является основным методом, используемым для нанесения твердого, износостойкого покрытия, которое также обладает коррозионной и эрозионной стойкостью [37, 38]. В этом методе расплавленные или полурасплавленные частицы порошка напыляются на поверхность подложки высокоскоростным (до 700 м/с) и высокотемпературным газовым (до 3000 °C) потоком. Принцип HVOF заключается в том, что горючие газы большого объема подаются в камеру сгорания. Сгорание происходит внутри при очень высоком давлении. Затем они подаются в длинное ограничивающее сопло или цилиндр, через которые выходят из устройства, создавая сверхзвуковую газовую струю с очень высокими скоростями частиц. Частицы порошка вводятся в поток, нагреваются и направляются к подложке, на которой формируется покрытие (см. рисунок 1). При такой высокой скорости, частицы имеют меньшее время пребывания в высокотемпературной газовой среде, что позволяет получать покрытия с очень низкой пористостью, низким коэффициентом окисления, а также высокой адгезией к подложке [39].



Рисунок 1. Схематическое представление метода HVOF и его основные параметры напыления [33, 40]

На сегодняшний день технология HVOF считается современным аналогом HVAF. Они отличаются используемыми газами, горелками и получаемыми результатами. В работе [41] авторов Abdullahi K. Gujba, Mohammed S. Mahdipoor, Mamoun Medraj покрытие WC-10Co-4Cr было нанесено методами HVOF и HVAF, исследованы их микроструктура и свойства. Оба метода нанесли толстые покрытия WC-10Co-4Cr на Ti-6Al-4V. Были достигнуты толщины покрытия 220 и 170 мкм для HVAF и HVOF, соответственно. Покрытие HVAF показало более однородную и неизмененную фазу WC по сравнению с покрытием HVOF, где хрупкая фаза W<sub>2</sub>C образовалась из-за обезуглероживания WC. Это считалось одним из основных микроструктурных различий между методами HVAF и HVOF наряду с наличием значительного количества расплавленного материала, окружающего частично расплавленные частицы WC в покрытии HVOF, см. рис.2. Причина неизмененной фазы WC в покрытии HVAF была связана с более низкой температурой и более высокой скоростью частиц, связанных с HVAF. Образование нежелательной фазы W<sub>2</sub>C привело к снижению микротвердости поверхности для HVOF по сравнению с HVAF.



Рисунок 2. Микрофотографии поперечного сечения напыленных покрытий HVAF (а и в) и HVOF (б и г) [41]

Однако в аналогичных работах [42, 43] отмечается, что значения твердости покрытий, нанесенных методом HVOF, значительно выше, чем у аналога, нанесенного методом HVAF, что было связано с большим растворением карбида.

Микроструктуры и характеристики покрытий WC-Co-Cr зависят не только от типа систем термического напыления, но и от технологических параметров напыления, частиц порошка сырья (вид, морфология, состав) и вида используемого топлива [44]. Karla О.М и др. в своих работах исследовали влияние параметров напыления на микроструктуру и износостойкость покрытий WC-10Co-4Cr при сухом скольжении [44]. Учитывались два параметра: тип пламени (восстановительное, нейтральное и окислительное) и площадь выхода сопла напылительной горелки ( $\phi = 1,5$  мм,  $\phi = 2,4$  мм,  $\phi = 4,8$  мм). Для всех испытанных условий давление ацетилена и кислорода поддерживалось постоянным на уровне 0,7 и 4 Бар соответственно. Как показали результаты анализа, что образец нанесенный с помощью восстановительного пламени, богатого топливом, сохранил самое высокое содержание WC (≈24%) по сравнению с покрытиями, нанесенными с использованием нейтрального и окислительного кислородом пламени, которое показывало большую степень обезуглероживания (значительное присутствие элементарных пиков W и Со<sub>3</sub>W<sub>3</sub>C), а соответствующая фаза карбида вольфрама (WC) снижалась до минимума (5% и 2% соответственно). Такое поведение было связано с химическим состоянием, богатым топливом, которое вызвано низкой температурой и высокой скоростью частиц. Напротив, высокие температуры и более длительное время пребывания частиц были достигнуты при нейтральном и окислительном пламени, что привело к более высокой степени разложения частиц карбида вольфрама. Площадь поперечного сечения сопла, являющаяся вторым параметром газопламенного напыления, также оказала существенное влияние на микроструктуру покрытия [44]. Сопла с небольшой выходной площадью были связаны с более высокими скоростями частиц и, следовательно, с более низкими температурами частиц и покрытиями с более однородной и плотной микроструктурой. А более высокая выходная площадь ограничивала степень деформации частиц, поскольку достигаются низкие скорости частин.

V. P. Nguyen, T. N. Dang и др. в своей работе [45] изучали влияние толщины покрытия на усталостную прочность валов из стали AISI1045 с покрытием HVOF WC-10Co-4Cr и твердым хромированием. В результате чего, в образцах с закаленным хромовым покрытием усталостная трещина возникает по поверхности покрытия, распространяется через покрытие, а затем развивается по толщине подложки, вызывая окончательное разрушение. По мере увеличения толщины покрытия хромированных образцов увеличивается плотность микротрещин и, следовательно, снижается усталостная прочность. А усталостная прочность образца, покрытого методом HVOF, увеличивается с увеличением толщины покрытия, что может быть связано с величиной остаточного напряжения сжатия по границе раздела подложка-покрытие (см. рисунок 3). Аналогичные результаты обсуждались и в работах [46, 47].



Рисунок 3. Усталостная прочность в зависимости от толщины покрытия [45]

#### 2.2 Свойства износостойкости

В работе Wu, Y., Wang, B. и соавт. [48] были получены покрытия WC-10Co-4Cr методом напыления HVOF. Покрытие имело низкую пористость, высокую микротвердость и однородное распределение частиц карбида вольфрама (WC). Было обнаружено, что с увеличением нагрузки коэффициенты трения покрытия WC-10Co-4Cr и штампованной стали Cr12MoV (для холодной обработки) постепенно снижаются. Коэффициенты трения и потери массы покрытия при износе были сравнительно ниже, чем у стали Cr12MoV (см. рисунок 4). Для стали Cr12MoV основными механизмами износа были пластическая деформация и окисление, а у покрытия WC-10Co-4Cr при нагрузках 30 и 50 Н были экструзионная деформация и абразивный износ.



Рисунок 4. Кумулятивные потери массы и коэффициенты трения покрытия WC-10Co-4Cr и щтамповой стали для холодной обработки: нагрузка 30 H (a) и 50 H (б) [48]

Во многих исследованиях [49, 50] отмечаются, что в покрытиях WC-10Co-4Cr, полученных методом HVOF, происходит обезуглероживание (уменьшение содержания углерода) и разложение карбида вольфрам (WC) на карбида дивольфрама (W2C) во время напыления, что непосредственно влияет на износостойкость покрытия. Однако, в работе [51] говорится, что процент обезуглероживания до 60% не влияет на износостойкость покрытий. Соответственно, покрытия с высокой твердостью и износостойкостью могут быть получены с помощью всех систем напыления HVOF при правильном выборе напыляемого порошка и технологических параметров. Напомним, что в этой работе авторы проводили исследования с различными системами напыления HVOF, с использованием семи различных порошков WC-Co и WC-Co-Cr.

В целом, поведение износостойкости при скольжении контролировалось распределением твердых частиц в микроструктуре и наличием твердых карбидов вольфрама (WC) и карбидов дивольфрама (W<sub>2</sub>C) фаз, и такие факторы, как обезуглероженные фазы (W<sub>2</sub>C и Co<sub>6</sub>W<sub>6</sub>C), слабые межфазные связи, влияющие на износостойкость покрытия не были решены путем оптимизации процесса напыления HVOF, поскольку это была отработанная технология.

Поэтому в работе [52] все большее внимание уделяется улучшению структуры исходного порошкового материала, путем смешивания его с порошком коричневого оксида алюминия (150–250 мкм) в массовом соотношении 1:5, для повышения износостойкости покрытия. То есть, новый процесс обработки с использованием оксида алюминия для изготовления полностью уплотненных, ультрадисперсных микроструктурных и идеально сферических частиц WC-Co применяется непосредственно к методу HVOF. На основе этого нового процесса, в этой работе полностью устранено явление обезуглероживания, влияющие на износостойкость покрытия (см. рисунок 5).



Рисунок 5. Фазовый состав покрытий, полученных методом напыления HVOF пористого и полностью уплотненного порошка исходного сырья [52]

Была получена уникальная связующая структура с нанокристаллическими и аморфными соединениями. Благодаря такой структуре износостойкость нового покрытия WC-Co, напыленного методом HVOF при температуре 1350 °C была в 4 раза выше, чем у несмешанного покрытия. Отмечается, что предложенный способ может быть применен и к другим различным керамическим покрытиям, такие как WC-Co-Cr и Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>-NiCr, для улучшения износостойких свойств покрытия.

Таким образом, необходимо правильно выбрать порошковый материал и тщательно оптимизировать параметры напыления, чтобы обеспечить достаточную скорость частиц с целью получения долговечных покрытий, одновременно предотвращая перегрев частиц для предотвращения обезуглероживания.

# 2.3 Эрозионные и коррозионные свойства покрытий

В немногих опубликованных работах основное внимание уделялось влиянию параметров напыления, играющих важную роль в определении микроструктуры и, в свою очередь, коррозионной и эрозионной стойкости металлокерамических покрытий WC-10Co-4Cr, напыленных методом HVOF.

Li, S., Guo, Z. и др. [53] рассматривают коррозионные свойства покрытий WC-17Co, WC-10Co-4Cr, Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>-25NiCr, полученных методом HVOF в щелочно-сульфидном растворе. Проводится восемнадцатидневное испытание погружением и анализ скорости коррозии показывает, что покрытие Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>-25NiCr с низкой пористостью обладает наилучшей коррозионной стойкостью. Однако в других растворах коррозионные свойства покрытий на основе карбида вольфрама выражены с лучшей стороны.

Например, в работе [54] металкерамические покрытия WC/Co-Cr и WC/Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>/Ni толщиной от 300 до 450 мкм были получены методом HVOF для сравнения морфологических и механических свойств, а также поведения при электрохимической коррозии. Образец, содержащий Co и Cr в металлической матрице, имел коррозионный потенциал по сравнению с образцом, содержащим только Ni в металлической матрице металлокерамического покрытия. Однако оба покрытия показали аналогичную кинетику коррозии, основанную на определенных значениях плотности тока коррозии (см. рисунок 6). Также покрытие WC/Co-Cr было более твердым, имело более низкий коэффициент трения и более низкий уровень пористости по сравнению с покрытием WC/Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>/Ni.

С. R. C. Lima и др. [55] в качестве исходного сырья в способе HVOF использовали три порошковых материала  $Cr_3C_2$ -25NiCr, WC-17Co и WC-12Co. Покрытие WC-17Co показало лучшие результаты при испытании на эрозию, что было связано с уникальным сочетанием параметров высокой микротвердости и низкой пористости (см. рисунок 7). Коррозионное поведение покрытия  $Cr_3C_2$ -25Ni-Cr было наименее благоприятным из всех испытанных образцов, что возможно были обусловлены с высокой шероховатостью и высокой пористостью, а также разрушением пассированного слоя.



Рисунок 6. Полулогарифмические поляризационные кривые WC/Co-Cr (1) и WC/Cr3C2/Ni (2) [54]

Эрозионные свойства термически напыляемых покрытий из карбида вольфрама (WC) исследовались многими учеными [56, 57]. В работе [56] авторы исследовали коммерческое покрытие WC-10Co-4Cr, нанесенное с помощью HVOF на подложку AISI 4140. Они показали, что устойчивость образцов покрытия к эрозионному износу была значительно улучшена. Износостойкость сравнивалась с износостойкостью материала без покрытия. При малом угле удара основным механизмом эрозионного износа были микрорезания, а также разрушение горизонтальных трещин. В аналогичном исследовании [57] был проведен анализ характеристик эрозионного износа образцов подложек SS304, покрытых WC-10Co-4Cr и Ni-20Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Было замечено, что образцы, покрытые WC-10Co-4Cr, дают лучшие характеристики, чем Ni-20Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.

В целом покрытия, выбираемые для затворов и седел, должны отвечать строгим эксплуатационным требованиям и обеспечивать надежное газонепроницаемое уплотнение металл-металл. Как показал анализ литературы, процесс нанесения покрытий с использованием высокоскоростного кислородно-топливного напыления (HVOF) улучшает свойства поверхности, повышая износостойкость и коррозионную стойкость, а также обеспечивают эффективное уплотнение между функциональными поверхностями. Однако, по литературным данным можно сказать, что недостаточно изучены закономерности формирования структурно-фазовых состояний HVOFпокрытий на основе WC-10Co-4Cr.



Рисунок 7. Сравнительные результаты линейного износа покрытий при эрозионно-коррозионных испытаниях [55]

Поэтому вопрос проведения комплексных экспериментальных исследований структурно-фазового состояния покрытий на основе карбида вольфрама в зависимости от технологического режима напыления остается актуальным. Также более детальное понимание кинетики формирования структуры и изменение механических, трибологических, эрозионных и коррозионных характеристик покрытий на основе карбида вольфрама в зависимости от технологического режима напыления и от характеристик порошка имеет важное значение для разработки технологического процесса поверхностной обработки компонентов шиберных задвижек.

Порошки для нанесения покрытий, материалы подложки	Методы нанесения покрытий	Параметры напыления, варьированные параметры	Полученные данные	Замечания	Ссылки
1. Порошок WC-10Co-4Cr (WOKA 3652, Oerlikon Metco Co. Ltd., Швейца- рия), размер частиц от 15 до 45 мкм. 2. Сталь AISI 1045	1. Jet Kote HVOF (Stellite Coatings, Inc., США) 2. Твердое хроми- рование	<ol> <li>Сжиженный нефтяной газ (пропан-бутан), кислород, воз- дух, расстояния напыления - 210 мм для HVOF</li> <li>Хромовая кислота (250 г/л), серная кислота (2,5 г/л)</li> <li>Варьирована толщина по- крытий.</li> </ol>	Усталостная прочность образцов с покрытием HVOF имеет тенденцию увеличиваться с увеличением тол- щины покрытия. Напротив, усталост- ная прочность твердых хромирован- ных образцов уменьшается с увели- чением толщины покрытия	Увеличение устало- стной прочности было связано с ос- таточным напряже- нием	[45]
1. Порошок WC-10Co-4Cr (Кастолина, Канада), раз- мер частиц от 15 до 45 мкм. 2. Сплав Тi-6Al-4V.	1. Intelli-Jet AC HVAF. 2. DJ2701 HVOF.	<ol> <li>Пропилен, азот, расстояние напыления – 76,5 и 50,8 мм.</li> <li>Топливо, кислород, воздух, расстояние напыления – 200– 250 мм.</li> <li>Варьированы методы газо- термического напыления.</li> </ol>	Покрытие WC-10Co-4Cr, нанесенное методом HVAF, показало наимень- шую степень обезуглероживания, бо- лее однородную и неизменную фазу WC, достигнув наилучших свойств с точки зрения твердости, и медлен- нее подвергалось эрозии по сравне- нию с покрытием HVOF, где хрупкая фаза W <sub>2</sub> C образовалась из-за обез- углероживания WC.	Обуглероживание покрытий уменьша- ется при использо- вании пламени с бо- лее низкой темпе- ратурой и более вы- сокой скоростью ча- стиц. Увеличение скорости удара при-	[41]

Таблица. Корреляционная таблица данных по вышеизложенной проблеме получения карбидных покрытий с применением различных технологий напыления

# ПРИМЕНЕНИЕ ТЕХНОЛОГИИ HVOF ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ ИЗНОСОСТОЙКИХ ПОКРЫТИЙ НА ОСНОВЕ WC – ОБЗОР

Порошки для нанесения покрытий, материалы подложки	Методы нанесения покрытий	Параметры напыления, варьированные параметры	Полученные данные	Замечания	Ссылки
	•			водит к более быст- рому началу эрозии.	
<ol> <li>Агломерированный и спеченный порошок WC- 10Co-4Cr с размером час- тиц 45±11 мкм.</li> <li>Низкоуглеродистая сталь ASTM A36.</li> </ol>	CastoDyn DS 8000 (Castolin Eutectic) HVOF.	<ol> <li>Кислород и ацетилен, рас- стояние напыления – 200 мм.</li> <li>Варьированы поток ацети- ленового газа и площадь попе- речного сечения сопла.</li> </ol>	Во время перехода от пламени, бо- гатого топливом, к пламени, богато- му кислородом, в покрытиях было меньше накопленных частиц WC и больше обезуглероживания и реак- ции со связующей фазой. А пламя, богатое топливом, снижало тепловы- деление во время напыления и, сле- довательно, степень разложения WC на W <sub>2</sub> C, W и Co <sub>3</sub> W <sub>3</sub> C. Сопла с не- большой выходной площадью были связаны с более высокими скоростя- ми и низкими температурами частиц, а более высокая выходная площадь ограничивала степень деформации частиц, поскольку обеспечиваются низкие скорости частиц.	Уменьшение нагре- вательной способ- ности пламени и/или увеличение его скорости обес- печивало более ни- зкие уровни обезуг- лероживания	[44]
1. Агломерированный и спеченный порошок WC- 10Co-4Cr с размером час- тиц 45±15 мкм (Large Solar Thermal Spraying Material Co. Ltd., Чэнду, Китай). 2. Сталь AISI 1045.	<ol> <li>Praxair Tafa– JP8000 HVOF (США).</li> <li>Холодная штам- повка.</li> </ol>	<ol> <li>Керосин, кислород, расстояние напыления – 300 мм.</li> <li>Варьирована исследуемая среда в зависимости от метода.</li> </ol>	Коэффициенты трения и потери мас- сы при износе покрытия WC-10Co- 4Cr были явно ниже, чем у стали Cr12MoV.	С увеличением на- грузки коэффициен- ты трения исследу- емых материалов уменьшались	[48]
1. Агломерированные и спеченные порошки WC- Со 83-17, WC-Со 88-12, расплавленный порошок WC-Со 88-12 с размером частиц 45±10 мкм; спечен- ный порошок WC-Со 88-12 с размером частиц 45±5,6 мкм; спеченный измель- ченный порошок WC-Со- Сг 86-10-4 с размером ча- стиц 45±11 мкм; спечен- ные порошки WC-Со-Сг 86-10-4, WC-Со-Сг 86-6-8 с размером частиц 45±15 мкм. 2. Мягкая сталь.	1. HVOF systems Jet Kote (Stellite Coatings, Goshen, IN). 2. HVOF Top Gun (UTP Schweißmaterial Bad Krozingen, Germany). 3. HVOF Diamond Jet (DJ) Standard. 4. HVOF DJ 2600. 5. HVOF DJ 2700 (Sulzer Metco, Westbury, NY). 6. HVOF JP-5000 (Tafa, Concord, NH). 7. HVOF Top Gun-K (GTV, Luckenbach, Germany).	<ol> <li>Водород, этилен, пропан, кислород.</li> <li>Водород, этилен, пропан, кислород.</li> <li>Пропан, кислород.</li> <li>Водород, кислород.</li> <li>Пропан, этилен, кислород.</li> <li>Керосин, кислород.</li> <li>Керосин, кислород.</li> <li>Варьированы различные ви- ды топлива и различные сис- темы напыления HVOF.</li> </ol>	Было определено, что обезуглеро- живание не влияет на свойства по- крытий, такие как твердость и изно- состойкость, когда потери углерода остаются ниже 60%. По твердости, износостойкости и микроструктуре покрытия WC-Co-Cr были сопостави- мы с покрытиями WC-Co, однако коррозионная стойкость WCCo-Cr был значительно выше.	Высокие износо- стойкие покрытия могут быть получе- ны всеми система- ми напыления HVOF при правиль- ном выборе техно- логических параме- тров	[51]
<ol> <li>Ультрадисперсный ком- позитный порошок WC- 12C (250 нм).</li> <li>Стальная подложка.</li> </ol>	HVOF, JP5000.	<ol> <li>Кислород, керосин, азот, расстояние напыления – 360 мм.</li> <li>Варьирован размер частиц исходного сырья</li> </ol>	Получение уплотненных, сферичес- ких частиц WC-Со без каких-либо фазовых изменений с использовани- ем оксида алюминия значительно повысило износостойкость покрытия.	Предлагаемый под- ход также применим к различным типам металлокерамичес- ких покрытий.	[52]
1. Агломированные и спе- ченные порошки WC- 17Co, WC-10Co-4Cr, Cr <sub>3</sub> C <sub>2</sub> -25NiCr с размером частиц 45±15 мкм. 2. Сталь AISI 1045.	JP5000 HVOF (Praxair, США).	<ol> <li>Керосин, кислород, сжатый воздух, расстояние напыления – 350 мм.</li> <li>Варьированы исследуемые порошки.</li> </ol>	Покрытие Cr <sub>3</sub> C <sub>2</sub> -25NiCr показало наилучшую коорозионную стойкость среди трех покрытий.	Коррозия происхо- дила в основном в связующей фазе из- за различных потен- циалов между твер- дой фазой и связу- ющей фазой.	[53]
1. Были использованы два металлокерамических по- рошка от компании Oerlikon Deutschland Holding GmbH (WC/Co-Cr 86/10–4 и WC/Cr <sub>3</sub> C <sub>2</sub> /Ni 73/20/7). Обе партии име- ли размер частиц 45±15 мкм.	HVOF (K2, GTV GmbH).	Керосин, кислород, газ-носи- тель азот, расстояние напыле- ния для WC-Co-Cr – 295 мм, для WC-Cr <sub>3</sub> C <sub>2</sub> -Ni – 280 мм. 2. Варьированы исследуемые порошки и скорости подачи по- рошка.	Было обнаружено, что скорость по- дачи порошка сильно влияет на ха- рактеристики металлокерамических покрытий, то есть на микроструктуру покрытий и, косвенно, на характер износа при скольжении, соответст- венно, на электрохимическую корро- зионную стойкость.	Уменьшение массо- вого расхода по- рошка значительно улучшило качество покрытия (напри- мер, пористость, морфологию, твер- дость). Резкое сни- жение массового	[54]

Порошки для нанесения покрытий, материалы подложки	Методы нанесения покрытий	Параметры напыления, варьированные параметры	Полученные данные	Замечания	Ссылки
2. Нержавеющий сталь X6CrNiMoTi17-12-2 (EN 1.4571).			Напыляемое покрытие WC/Co-Cr об- ладало лучшей коррозионной стой- костью, чем WC/Cr <sub>3</sub> C <sub>2</sub> /Ni в 3,5 мас.% растворе NaCl.	расхода привело к значительному уве- личению степени пористости.	
1. Сг₃С₂–25NiСr, WC– 17Со, WC–12Со с разме- ром частиц 45±15 мкм. 2. Сталь AISI 1020.	HVOF (JP-5000).	<ol> <li>Керосин, кислород, воздух, расстояния напыления:</li> <li>250 мм;</li> <li>350 мм;</li> <li>350 мм.</li> <li>Варьированы исследуемые порошки.</li> </ol>	Эрозионная стойкость обоих покры- тий (WC-17Co и WC-12Co) показыва- ет хорошие результаты, близкие друг к другу, характеристики покры- тия Cr <sub>3</sub> C <sub>2</sub> -25NiCr были наихудшими из всех исследованных образцов.	Стойкость к эрози- онно-коррозионно- му износу отдает предпочтение ме- таллокерамике из- за их гораздо более высокой твердости.	[55]

#### 3. Выводы

Согласно, обзору и подробному анализу имеющейся литературы на тему «Применение технологии HVOF для получения износостойких покрытий на основе WC» установлено, что:

 наиболее подходящими материалами для увеличения ресурса деталей запорной арматуры являлись материалы на основе карбидов, обладающие высокими эксплуатационными характеристиками, в частности WC-Co-Cr;

 металлокерамические покрытия, полученные методом HVOF, по своим трибологическим свойствам имели преимущество перед гальваническим хромированием;

 покрытия, полученные методом HVAF, превосходили покрытия, полученные методом HVOF. Более низкие характеристики HVOF объяснялись образованием нежелательной хрупкой фазы W<sub>2</sub>C;

— наличие твердой, но хрупкой фазы  $W_2C$  в составе покрытий WC-Co-Cr, WC-Co, полученных методом HVOF, повышало твердость;

 микроструктура покрытий на основе WC, полученных методами HVOF/HVAF, имела однородную, плотную структуру;

 образец, содержащий Со и Сг в металлической матрице, имел коррозионный потенциал по сравнению с образцом, содержащим только Ni в металлической матрице металлокерамического покрытия;

 характеристики покрытий на основе WC зависели не только от системы термического напыления, но и от параметров напыления, типа частиц исходного порошка, вида используемого топлива;

 обезуглероживание покрытий на основе карбида вольфрама уменьшилось в низкотемпературном пламени;

– пламя, обогащенное не кислородом, а топливом, уменьшало степень разложения WC на  $W_2C$ ,  $Co_3W_3C$  при напылении;

 для устранения явления обезуглероживания, т.е. хрупких фаз W<sub>2</sub>C, был проведен процесс полного уплотнения исходного порошка WC-Co для повышения износостойкости покрытия WC-Co напыленного методом HVOF.

В целом, на наш взгляд, износостойкие покрытия на основе WC, полученные методом HVOF, могут

увеличить фактический срок службы арматуры и длительность межремонтного периода, но все же требуют тщательных исследований, кроме того, скрытые резервы сравнительно новой технологии высокоскоростного кислородно-топливного напыления (HVOF) все еще не раскрыты.

Поэтому, авторы данной статьи считают, что путем доработки системы HVOF, подбора оптимальных режимов и состава порошков можно улучшить трибологические и коррозионные характеристики покрытий WC-Co-Cr и применить их для повышения срока службы шиберных задвижек. Для осуществления этих работ будет использоваться установка для высокоскоростного кислородно-топливного напыления HVOF Termika-3 (ООО «Плазмацентр», г. Санкт-Петербург), расположенная в научно-производственной компании TOO «PlasmaScience» (г. Усть-Каменогорск, Казахстан).

#### ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES

- Шеров К.Т., Габдысалык Р. Анализ и исследование проблемы изготовления крупных задвижек для магистральных трубопроводов // Труды университета. Караганда: Изд-во КарГТУ. – 2018. № 1 (70) – С. 13–17. [Sherov K.T., Gabdysalyk R. Analiz i issledovanie problemy izgotovleniya krupnykh zadvizhek dlya magistral'nykh truboprovodov // Trudy universiteta. Karaganda: Izd-vo KarGTU. – 2018. No. 1 (70) – Р. 13–17.]
- 2. https://www.youtube.com/watch?v=wg5IZN2noH0
- 3. https://www.uzpa.kz/about/
- Полосков С. С. Проблемы наплавки уплотнительных поверхностей трубопроводной арматуры и пути их решения // Вестник Донского государственного технического университета. – 2019. Т. 19. № 4. – С. 349–356. [Poloskov S. S. Problemy naplavki uplotnitel'nykh poverkhnostey truboprovodnoy armatury i puti ikh resheniya // Vestnik Donskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. – 2019. Т. 19. No. 4. – Р. 349–356.]
- Туков С.А., Корчагина М.В., Киреев С.О. Проблемы герметичности шаровых кранов и методы их решения // Донской государственный технический университет. – 2018, С. 12–15. [Tukov S.A., Korchagina M.V., Kireev S.O. Problemy germetichnosti sharovykh kranov i metody ikh resheniya // Donskoy gosudarstvennyy tekhnicheskiy universitet. – 2018, P. 12–15.]
- 6. http://www.indmet.ru/tech/vyisokoskorostnoegazotermicheskoe-napyilenie-hvof

- Keshavamurthy R., Sudhan M.D., Kumar A., Ranjan V., Singh P., Singh A. Wear behaviour of hard chrome and tungsten carbide-HVOF coatings // Materialstoday: proceedings. – 2018. V. 5. P. 24587–24594. https://doi.org/10.1016/j.matpr.2018.10.256
- Kumar H., Chittosiya Ch., Shukla V.N. HVOF Sprayed WC Based Cermet Coating for Mitigation of Cavitation, Erosion & Abrasion in Hydro Turbine Blade // Materials Today: Proceedings. – 2018. V. 5. P. 6413–6420. https://doi.org/10.1016/j.matpr.2017.12.253
- Li G.P., Peng Y.B., Yan L.W., Xu T., Long J.Z., Luo F.H. Effects of Cr concentration on the microstructure and properties of WC-Ni cemented carbides // Journal of Materials Research and Technology. – 2020. V.9. – P. 902-907. https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2019.11.030
- 10. Дружнова Я.С. Развитие методов газотермического напыления упрочняющих покрытий на основе карбидов вольфрама и хрома (обзор) // Труды ВИАМ. – 2022. № 10 (116). [Druzhnova Ya.S. Razvitie metodov gazotermicheskogo napyleniya uprochnyayushchikh pokrytiy na osnove karbidov vol'frama i khroma (obzor) // Trudy VIAM. – 2022. No. 10 (116).]
- Jianxing Yu, Xin Liu, Yang Yu, Haoda Li, Pengfei Liu, Kaihang Huang and Ruoke Sun. Research and Application of High-Velocity Oxygen Fuel Coatings // Coatings. – 2022. V. 12(6). P. 828. https://doi.org/10.3390/coatings12060828
- 12. Samodurova, M., Shaburova, N., Samoilova, O., Moghaddam A.O., Pashkeev K., Ul'yanitckiy V., Trofimov E. Properties of WC–10%Co–4%Cr Detonation Spray Coating Deposited on the Al–4%Cu–1%Mg Alloy // Materials. – 2021. V. 14(5). https://doi.org/10.3390/ma14051206
- 13. Ghadami F., Sabour Rouh Aghdam A. Improvement of high velocity oxy-fuel spray coatings by thermal posttreatments: A critical review // Thin Solid Films. – 2019.
   V.678. P. 42–52. https://doi.org/10.1016/j.tsf.2019.02.019
- Maharajan S., Michael Thomas Rex F., Ravindran D., Rajakarunakaran S. Erosive and corrosive wear performance and characterization studies of plasma-sprayed WC/Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub> coating on SS316 //Applied Ceramic Technology. – 2022. https://doi.org/10.1111/jjac.14118
- Bhosale D.G., Ram Prabhu T., Rathod W.S. Sliding and erosion wear behaviour of thermal sprayed WC-Cr3C2-Ni coatings // Surface and Coatings Technology. – 2020.
   V. 400. https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2020.126192
- Vats A, Patnaik A., Meena M.L, Shringi D. Role of microfactors on microstructure and on the tribological performance of HVOF coatings: A review // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2021. https://doi.org/10.1088/1757-899X/1017/1/012010
- Robert J.K. Wood, S. Herd, Mandar R. Thakare. A critical review of the tribocorrosion of cemented and thermal sprayed tungsten carbide // Tribology International. – 2018. P. 491–509. https://doi.org/10.1016/j.triboint.2017.10.006
- Zhou W.X., Zhou K.S., Li Y.X., Deng C.M., Zeng K.L. High temperature wear performance of HVOF-sprayed Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>-WC-NiCoCrMo and Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>-NiCr hardmetal coatings // Applied Surface Science. – 2017. V. 416, P. 33–44. https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2017.04.132
- Gopi R., Saravanan I., Devaraju A., Ponnusamy P. Tribological behaviour of thermal sprayed high velocity oxy-fuel coatings on tungsten carbide – A review // MaterialsToday: Proceeding. – 2020. V. 39. P. 292–295.

https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.07.133

- 20. Picas J.A. [et al.]. Microstructure and wear resistance of WC–Co by three consolidation processing techniques // International Journal of Refractory Metals and Hard Materials. – 2009. V. 27, P. 344–349. https://doi.org/10.1016/j.ijrmhm.2008.07.002
- http://www.indmet.ru/tech/vyisokoskorostnoegazotermicheskoe-napyilenie-hvof
- 22. https://www.plasmacentre.ru/oborudovanie/oborudovaniedlya-napyileniya/ustanovka-hvof-termika/
- 23. https://www.plasmascience.kz/оборудование/
- 24. http://www.coating-ball.com/ru/index.php?page=high-velocity-spray
- 25. http://www.flamespraytech.ru/processes/HVOF
- 26. Батиенков Р.В., Бурковская Н.П., Большакова А.Н., Худнев А.А. Высокотемпературные композиционные материалы с металлической матрицей (обзор) // Труды ВИАМ. – 2020. № 6–7 (89). [Batienkov R.V., Burkovskaya N.P., Bol'shakova A.N., Khudnev A.A. Vysokotemperaturnye kompozitsionnye materialy s metallicheskoy matritsey (obzor) // Trudy VIAM. – 2020. No. 6–7 (89).]
- 27. Mishra T.K., Kumar A., Sinha S.K. Experimental investigation and study of HVOF sprayed WC-12Co, WC-10Co-4Cr and Cr3C2-25NiCr coating on its sliding wear behavior // International Journal of Refractory Metals and Hard Materials. – 2021, V. 94.
- https://doi.org/10.1016/j.ijrmhm.2020.105404
  28. Magdy M. El Rayes, El-Sayed M. Sherif, Hany S. Abdo. Comparative study into microstructural and mechanical characterization of HVOF-WC-based coatings // Crystals. – 2022. 12(7), 969. https://doi.org/10.3390/cryst12070969
- Testa V., Morelli S., Bolelli G., Benedetti B., Puddu P., Sassatelli P., Lusvarghi L. Alternative metallic matrices for WC-based HVOF coatings // Surface and Coatings Technology. – 2020. V. 402. https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2020.126308
- Xiao-bin Liu, Jia-jie Kang, Wen Yue, Zhi-qiang Fu, Li-na Zhu, Ding-shun She, Jian Liang, Cheng-biao Wang. Performance evaluation of HVOF sprayed WC-10Co4Cr coatings under slurry erosion // Surface Engineering. – 2019. https://doi.org/10.1080/02670844.2019.1568661
- 31. Govande A.R., Chandak A., Sunil B.R., Dumpala R. Carbide-based thermal spray coatings: a review on performance characteristics and post-treatment // International Journal Refractory Metals and Hard Materials. – 2022. V. 103.

https://doi.org/10.1016/j.ijrmhm.2021.105772

- 32. Панин А.В. [и др.] Методы нанесения защитных покрытий: учебное пособие / А.В. Панин, А.Р. Шугуров, А.Г. Колмаков // Томский политехнический университет. – Томск: Изд-во ООО «СПБ Графикс», – 2020. – 109 с. [Panin A.V. [i dr.] Metody naneseniya zashchitnykh pokrytiy: uchebnoe posobie / A.V. Panin, A.R. Shugurov, A.G. Kolmakov // Tomskiy politekhnicheskiy universitet. – Tomsk: Izd-vo OOO "SPB Grafiks", – 2020. – 109 p.]
- 33. Donadei V, Koivoluoto H, Sarlin E, Vuoristo P. Lubricated icephobic coatings prepared by flame spraying with hybrid feedstock injection // Surface and Coatings Technology. – 2020. V. 403. https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2020.126396
- 34. Devaraj S., McDonald A., Chandra S. Metallization of porous polyethylene using a wire-arc spray process for heat transfer applications // Journal of Thermal Spray

Technology. – 2021. V. 30. P. 145–156. https://doi.org/10.1007/s11666-020-01119-1

- 35. Jhonattan de la Roche, Juan Manuel Alvarado-Orozco, Pablo Andres Gomez, Irene Garcia Cano, Sergi Dosta, Alejandro Toro. Hot corrosion behavior of dense CYSZ/YSZ bilayer coatings deposited by atmospheric plasma spray in Na2SO4 + V2O5 molten salts // Surface and Coatings Technology. – 2022. V. 432. https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2021.128066
- 36. Huang C., Arseenko M., Zhao L., Xie Y., Elsenberg A., Li W., Gartner F., Simar A., Klassen T. Property prediction and crack growth behavior in cold sprayed Cu deposits // Materials & Design. 2021. V. 206. https://doi.org/10.1016/j.matdes.2021.109826
- 37. Singh V., Singh I., Bansal A., Omer A., Singla A.K., Rampal A., Goyal D.K. Cavitation erosion behavior of high velocity oxy fuel (HVOF) sprayed (VC + CuNi-Cr) based novel coatings on SS316 steel // Surface and Coatings Technology. – 2022. V. 432. https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2021.128052
- Praveen AS, Arjunan A. High-temperature oxidation and erosion of HVOF sprayed NiCrSiB/Al2O3 and NiCrSiB/WC–Co coatings // Applied Surface Science Advances. – 2022. V. 7. https://doi.org/10.1016/j.apsadv.2021.100191
- 39. Pishva, P.; Salehi, M.; Golozar, M.A. Effect of grinding on surface characteristics of HVOF-sprayed WC–10Co– 4Cr coatings // Surface Engineering. – 2020, V. 36, P. 1180–1189.

https://doi.org/10.1080/02670844.2019.1647938

- Jonda E., Łatka L. Comparative analysis of mechanical properties of WC-based cermet coatings sprayed by HVOF onto AZ31 magnesium alloy substrates // Advances in Science and Technology Research Journal. – 2021. V. 15. https://doi.org/10.12913/22998624/135979
- 41. Abdullahi K. Gujba, Mohammed S. Mahdipoor, Mamoun Medraj. Water droplet impingement erosion performance of WC-based coating sprayed by HVAF and HVOF // Wear an International Journal on the Science and Technology of Friction, Lubrication and Wear. – 2021. V. 484–485. https://doi.org/10.1016/j.wear.2021.203904
- 42. Bolelli G., Berger L.M., Börner T., Koivuluoto H., Lusvarghi L., Lyphout C., Markocsan N., Matikainen V., Nylén P., Sassatelli P., Trache R., Vuoristo P. Tribology of HVOF- and HVAF-sprayed WC–10Co4Cr hardmetal coatings: A comparative assessment // Surface & Coatings Technology. – 2015. V. 265. https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2015.01.048
- 43. Marzanna Ksiazek, Ilona Nejman and Lukasz Boron. Investigation on Microstructure, Mechanical and Wear Properties of HVOF Sprayed Composite Coatings (WC– Co + CR) On Ductile Cast Iron // Materials. – 2021. V. 14(12). https://doi.org/10.3390/ma14123282
- 44. Karla O.M. and [et al.]. Microstructure and Properties Characterization of WC-Co-Cr Thermal Spray Coatings // Journal of Minerals and Materials Characterization and Engineering. – 2018. V. 6. P. 482-497. https://doi.org/10.4236/jmmce.2018.64034
- Nguyen V. P., Dang T. N., Le C. C., & Wang D. A. Effect of coating thickness on fatigue behavior of AISI 1045 steel with HVOF thermal spray and hard chrome electroplating // Journal of Thermal Spray Technology. – 2020. V. 29(8). P. 1968–1981. https://doi.org/10.1007/s11666-020-01090-x

- 46. Vinh P. N., Thien N. D., & Le Chi C. Evaluating the effect of HVOF sprayed WC-10Co-4Cr and hard chromium electroplated coatings on fatigue strength of axle-shaped machine parts // In International Conference on Engineering Research and Applications. – 2018. P. 309–317. https://doi.org/10.1007/978-3-030-04792-4\_41
- 47. Castro R. D. M., Rocha A. D. S., Mercado Curi E. I., & Peruch F. A comparison of microstructural, mechanical and tribological properties of WC-10Co4Cr-HVOF coating and hard chrome to use in hydraulic cylinders // American Journal of Materials Science. Rosemead. – 2018. Vol. 8. No. 1. P. 15–26. https://doi.org/10.5923/j.materials.20180801.03
- 48. Wu Y., Wang B., Hong S., Zhang J., Qin Y., & Li G. Dry sliding wear properties of HVOF sprayed WC–10Co–4Cr coating // Transactions of the Indian Institute of Metals. 2015. V. 68(4). P. 581–586. https://doi.org/10.1007/s12666-014-0487-3
- 49. Wang D., Zhang B., Jia C., Gao F., Yu Y., Chu K., Zhang M., Zhao X. Influence of carbide grain size and crystal characteristics on the microstructure and mechanical properties of HVOF-sprayed WC-CoCr coatings // International Journal of Refractory Metals and Hard Materials. 2017. V. 69. P. 138–152 https://doi.org/10.1016/j.ijrmhm.2017.08.008
- 50. Xiang D., Cheng X.D., Xiang Y.U., Chao L.I., Ding Z.X. Structure and cavitation erosion behavior of HVOF sprayed multi-dimensional WC–10Co4Cr coating // Transactions of Nonferrous Metals Society of China. – 2018. V. 28. P. 487–494. https://doi.org/10.1016/S1003-6326(18)64681-3
- 51. Schwetzke R., Kreye H., Therm J. Microstructure and properties of tungsten carbide coatings sprayed with various high velocity oxygen fuel spray systems // Journal of Spray Technology. – 1999. V. 8(3). P. 433–438. https://doi.org/10.1361/105996399770350395
- 52. Haibin W., Qingfan Q. Wear resistance enhancement of HVOF-sprayed WC-Co coating by complete densification of starting powder // Materials and Design. – 2020. V. 191. https://doi.org/10.1016/j.matdes.2020.108586
- 53. Li S., Guo Z., Xiong J., Lei Y., Li Y., Tang J. & Ye J. Corrosion behavior of HVOF sprayed hard face coatings in alkaline-sulfide solution // Applied Surface Science. – 2017. V. 416. P. 69–77. https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2017.04.149
- 54. Julian Eßler, Dino Woelk, Dragos Utu, Gabriela Marginean. Influence of the powder feed rate on the properties of HVOF sprayed WC-based cermet coatings // Materials Today: Proceedings. 2022. https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.11.120
- 55. Lima C. R. C. [et al.]. Developing alternative coatings for repair and restoration of pumps for caustic liquor transportation in the aluminum and nickel industry // Surface and Coatings Technology. 2015. V. 268. P. 123–133. https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2014.08.010
- 56. Zheng C. [et al.]. Experimental study on the erosion behavior of WC-based high-velocity oxygen-fuel spray coating // Powder Technology. 2017. V. 318. P. 383–389. https://doi.org/10.1016/j.powtec.2017.06.022
- 57. Singh J., Kumar S. and Mohapatra S. K. Tribological analysis of WC–10Co–4Cr and Ni– 20Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> coating on stainless steel 304 // Wear. – 2017. V. 376–377. P. 1105– 1111. https://doi.org/10.1016/j.wear.2017.01.032

### WC НЕГІЗІНДЕГІ ТОЗУҒА ТӨЗІМДІ ЖАБЫНДАРДЫ АЛУ ҮШІН НVOF ТЕХНОЛОГИЯСЫН ҚОЛДАНУ-ШОЛУ

Б.К. Рахадилов<sup>1)</sup>, Н. Мұқтанова<sup>2)</sup>, Л.Г. Журерова<sup>1)</sup>

# <sup>1)</sup> С. Аманжолов атындағы Шығыс Қазақстан университеті, Өскемен қаласы, Қазақстан <sup>2)</sup> Д. Серікбаев атындағы Шығыс Қазақстан техникалық университеті, Өскемен қаласы, Қазақстан

Мақалада мұнай және газ өнеркәсібінің магистральдық құбыр көлігі үшін шиберлі ысырмалардың тозуы мен қызмет ету мерзімінің негізгі мәселелері келтірілген. Бұл мәселелерді шешудің бір жолы-тозуға төзімді және коррозияға төзімді жабындардың жұқа қабатын қолдану. Материалдардың үнемі өсіп келе жатқан құнына, сондай-ақ материалдарға қойылатын талаптардың артуына байланысты соңғы уақытта жабындарды қолдану әдістеріне көбірек мән берілуде. Газдықтермиялық жабын әдістерінің ішінде жоғары жылдамдықты оттегіотынымен тозаңдау (HVOF) технологиясы қаттылығы мен адгезиясы жоғарылаған, сондай-ақ зрозия, коррозия және тозуға төзімділік қасиеттері жақсартылған, кеуектілігі 1%-дан аз жоғары тығыздықты жабындарды алуға мүмкіндік беретін жаңа және жылдам дамып келе жатқан технология болып табылады. Бұл шолу мақаласында әртүрлі бүрку технологиялары арқылы алынған карбидті жабындардың сипаттамаларына салыстырмалы шолу жасалды.

**Түйін сөздер:** WC-Co-Cr жабыны, HVOF технологиясы, тозуға төзімділік, адгезия, коррозияға төзімділік, термиялық тозаңдау.

### APPLICATION OF HVOF TECHNOLOGY FOR WC-BASED WEAR-RESISTANT COATINGS – AN OVERVIEW

#### B.K. Rakhadilov<sup>1</sup>), N. Muktanova<sup>2</sup>), L.G. Zhurerova<sup>1</sup>)

#### <sup>1)</sup> S. Amanzholov East Kazakhstan University, Ust-Kamenogorsk, Kazakhstan <sup>2)</sup> D. Serikbayev East Kazakhstan Technical University, Ust-Kamenogorsk, Kazakhstan

The article presents the main problems of wear and service life of slide gate valves for trunk pipeline transport of oil and gas industry. One of the possible ways to solve these problems is the application of a thin layer of wear-resistant and corrosion-resistant coatings. Due to the ever-increasing cost of materials, as well as the increased requirements for materials, coating methods have recently become increasingly important. Among the gas-thermal coating methods, the High Velocity Oxygen-Fuel Spray (HVOF) technology is a new and rapidly developing technology that produces high density coatings with porosity less than 1%, with improved hardness and adhesion as well as improved erosion, corrosion and wear resistance properties. This overview article provides a comparative review of the characteristics of carbide coatings produced using different spraying technologies.

Keywords: WC-Co-Cr coatings, HVOF technology, wear resistance, adhesion, corrosion resistance, thermal spraying.

#### <u>https://doi.org/10.52676/1729-7885-2023-1-5-24</u> УДК 574.24

#### АЛТАЙ ЖОТАСЫНДАҒЫ ТУРИЗМ ӘСЕРІНЕН ТОПЫРАҚТЫҢ АУЫР МЕТАЛМЕН ЛАСТАНУЫ

#### Е.Б. Баделгажы, Б.А. Капсалямов, Ж.Б. Тусупова

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

#### Контактілерге арналған E-mail: erbahit.tourism@gmail.com

Бұл мақалада Қазақстандық Алтай және Моңғол Алтай жотасындағы бақылаусыз туризм әсерінен топырақтың ауыр металдармен ластанғаны туралы ақпараттар ұсынылған. Пандемия кезінде Қазақстан, Моңғолияда ішкі туризм ерекше жанданып, Алтай жотасына саяхаттау екі елдеде трендіге айналды. Мұндағы инфрақұрылым төмен дамығандықтан туристік көліктер асфальтталмаған жолдармен жүру, жаңа тарам жолдар шығару, биік тауларға жақындап бару үшін саз батпақтарды кешіп өту, жер қыртысын зақымдау қатарлы келеңсіз жағдайлар белең алуда. Авторлар тарапынан жоғарғы двигателді машиналардың салдарынан ондағы топырақ ауыр металдармен ластанған болуы туралы болжам жасап, арнайы эксперимент жүргізді. Нәтижесінде ондағы бүлінген топырақтарда таза топырақпен салыстырғанда қорғасын 12,5–15,8 мг/кг-ға, никель 16,1–33,7 мг/кг-ға, мырыш 15,6–17,1 мг/кг-ға, яғни ауыр металдың мөлшері 2–4 есе артқанын, жәнеде ауыр металдар топырақтың шайылуынан жолдың төменгі жағына шоғырлана бастағанын анықтады. Бұл көрсеткіш Моңғолия стандары бойынша қауіпті деңгейге жетпегенімен, никелдің деңгейі Қазақстан стандарты бойынша қауіпті деңгейден 2–3 есе көп, хроммен мыстың көлемі «қауіпті» деңгейдің сәл астында ғана тұр. Бұлай жалғаса берсе келесі 5 жылда мұндағы қорғасын, мырыш, никелдің мөлшері қауіпті деңгейден 2-4 есе артқана.

**Түйінді сөздер:** Қазақстандық Алтай, Моңғол Алтай жотасы, туризм, көліктер, топырақтық ластануы, ауыр металдар.

#### Кіріспе

Алтай жотасы Ресей, Қытай, Қазақстан, Моңғолияның шекарасында 2000 шақырымға жуық созылып орналасқан Орта Азияның ірі тау жотасы. Алтай жотасының экологиясы әлемдік климатқа әсері зор [1] жәнеде туризмды дамытуға жоғары потенциалды зонаға саналады [2]. Соңғы жылдары Алтай жотасы әлемге таныла бастағандықтан мұндағы бақылаусыз, бей-берекет туризмнан экосистемаға көп қауіптер төнуде [3, р. 14]. Қазақстан тарапыда, Моңғолия тарапыда Алтай тауында альпинизм, жаяу жүру, атпен, автомашинамен саяхаттау, альпинизм қатарлы экотуризмның негізгі түрлерін дамытуға жоспарлаған [4, р. 27], [5–7]. Алайда мұнда инфрақұрылым жақсы дамымағандықтан [8], [9] туристер көбейген сайн топырақ беті тапталу, қыртыс қабаты зақымдану әсерінен шөп өспеу, туристік нысандар маңы қоқысқа толу, орманды жерлерде шу көп шығарғаннан аңдар үркіп, басқа жаққа ауу сияқты экологияға кері әсерлі қолайсыз жағдайлар байқалуда.

Сурет-1-дегі картада Моңғолия, Қазақстан елдеріндегі Алтай жотасына саяхаттайтын негізгі маршруттар, яғни біздің эксперимент жүргізген маршруттар сызылған. Маршруттарға қысқаша анықтама берсек (кесте 1).



1-сурет. Таңдалған маршруттар сызбасы

Көрсеткіштер	Моңғол Алтай	Қазақстандық Алтай
Тандаған себеп	2019 жылдан бастап Моңғолия ішкі туризмінде тренд болған маршрут	Пандемиядан кейін Қазақстан ішкі туризмінде тренд болған маршруттардың бірі
Орны	Батыс Моңғолия, Баян-Өлгий аймағы	Шығыс Қазақстан облысы
Бағыты	Өлгий қаласы → Көкмойнақ ауылы → Бесбогда шыңы, Потанин мұз өзені → Сырғалы көлі → Бага Түргэн сарқырамасы → Цэнгэл сұмыны → Өлгий қаласы	Өскемен қаласы → Алтай қаласы → Қотанқарағай → Берел музейі → Қаракөл → Рахман қайнары → Австрия жолы → Зайсан көлі → Қиын керіш → Сибенің 5 көлі
Ұзындығы	580 шақырым	1150 шақырым
Жұмсалатын уақыт	3–4 күн	4–5 күн
Маршруттың типі	Әсем табиғат көру, Бесбоғдага тәуап ету, сиыну, (тәңіршілдік)	Әсем табиғат көру, Бұғы мүйізінің қанын дәрілікке ішу
Туристер саяхаттайтын уақыты	Маусымның 10-нан Шілденің 25-не дейін	Маусымның 10-нан Шілденің 30-на дейін
Жылына келетін туристер саны	2018 ж – 4071, 2019 ж – 44653, 2020 ж – 51183, 2021 ж – 29683, 2022 ж – 56096 ішкі турист [10]	2018 ж – 168941, 2019 ж – 181419, 2020 ж – 121072, 2021 ж – 125147, 2022 ж. тамыз айына дейін 101791 ішкі турист [11]
Транспорт түрі	А80 бензинін керектенетін УАЗ машиналары, А92 керектенетін қуатты двигателді көліктер	Барлық машиналар, А92 керектенетін қуатты двигателді көліктер
Машиналар саны	2018 ж – 1400–1700, 2019 ж – 4100–5100, 2020 ж – 4600– 5700, 2021 ж – 5800–7200, 2022 ж – 10600–13200 машин <sup>°)</sup>	2017 ж – 32–40 мың, 2018 ж – 33–43 мың, 2019 ж – 36–45 мың, 2020 ж – 24–30 мың машин <sup>°)</sup>

1-кесте. Маршруттардың қысқаша анықтамасы

\*) Есептеу нәтижесі бойынша

Ұлттық парктерге туристердің көптеп баруы, ондағы топырақ қабаты, ауаны, қоршаған ортаны ластайтыны туралы ғылыми мақалалар көп. Тіпті туризм әсерінен топырақ қабаты ауыр металмен ластанатын туралы зерттеулерде жүрілген. Италияның Везуви ұлттық паркінде туризм маусымының басында, аяғында алған сынамалар нәтижесінде Сr, Cu, Ni, Pb қатарлы ауыр металдармен ластанғанын дәлелдеген. Соның ішінде Си, Рb ауыр металдар антропогендік әсерден, Cr, Ni қатарлы ауыр металдар өрттен, субстраттық бұзылудан да болуы мүмкін екенін жазған [12]. Ал Қытайдың экотуризм курорттар маңы Cr, Cd қатарлы ауыр металмен ластанып, экологиялық қауіп деңгейі "өте күшті" категорияға жеткенін анықтаған [13]. Жәнеде туризм жанама түрде экологиялық факторларға әсер етіп, сол арқылы топырақ металдарының концентрациясына әсері (Cr, Ni, Cu, Zn, As, Cd, Рb қатарлы ауыр металдар концентрациясына) болатынын Қытайдың Poyang wetland көлінде жүргізген зерттеу нәтижесінде анықтаған [14]. Туризм топырақ температурасының өсуінеде әсер етеді [15].

Ауыр металдардың топыраққа түсуі: А.П. Виногородовтың ұсынған шкаласы бойынша топырақтың химиялық құрамында ауыр металдар әр түрлі деңгейде болатыны белгілі. Топыраққа ауыр металдардың түсуіде әр түрлі. Көбінесе ауыр металлургияны өңдеу заводтардан топыраққа түссе одан басқа, әр түрлі өндірістер, тынайтқыштар, автотехника арқылы түсуге болады.

Ауыр металдардың қоршаған ортаға түсетін бір жолы өсімдіктер арқылы топыраққа түседі. Кадмий көмір жағудан, мұнай өнімдерінен топыраққа, ауаға түседі [16, р. 58] Мырыш электр батареяларында көптеп кездеседі [16, р. 64]. Экологияға шығарылатын барлық газдардың 65%-ы автокөліктерге тиеслі және автокөліктерден шығатын газдардың құрамында бензапирен, альдегидтер, әр түрлі қорғасын қосылыстары бар [17]. Қазақстанда негізінен арзан, экологиялық таза емес бензиндер өндіреді. А80 бензиннің құрамында 0,17 г/л, А93 – 0,37 г/л қорғасын болады [21, р. 37]. Улаанбаатар қаласында жүргізген топырақтың ластануы туралы зерттеуде автокөліктер тұрағы, көлік жөндеу орталықтар маңы, жанармай бекеттер алаңы ауыр металдармен ластанғанын анықтаған. Мұнда Cr, Ni, Cu, Zn, As, Cd, Pb қатарлы барлық элемент автокөліктер арқылы топыраққа түсуі мүмкін екенін жазған. Себебі Улаанбаатар қаласындағы 500 мың көліктің 3/1-і батарейкалы «Hybrid Pruis» маркалы машиналар. Жәнеде машиналардың сыртқы куперлерін жөндеуде бронз, никель коспалы бояу, замаскаларды пайдаланады.

Ауыр металдардың топыраққа зияны: Ауыр металдар жалпылама ластаушы заттар болғандықтан коршаған ортаға зиянын тигізеді. Ауыр металдар жоғары концентрацияда болуы топыраққа, өсімдіктерге, су тіршілігіне және адам денсаулығына улы болып табылады. Ауыр металдар негізгі микробтық процестерге әсер етеді. Және топырақ биотасын уландыру арқылы топырақ микро организмдерінің саны мен белсенділігі төмендеуіне әсер етеді. Тіпті ауыр металдардың төмен концентрациясы өсімдіктің физиологиялық метаболизмін тежеуі мүмкін [18]. Басқаша айтқанда экожүйенің жұмысын нашарлатады. Өсімдіктер ауыр металдарды сіңіреді, және кейіннен қоректік тізбекте жинақталуы арқылы жануарлар мен адам денсаулығына қауіпті әсер көрсетеді [19]. Топырақтағы ауыр металдың деңгейі қалыпты нормадан асып, улы деңгейге жеткенде топырақтағы өсімдіктердің тамыры күйіп көп жылдар бойы өспей қалуы мүмкін.

#### Мақсаты, әдістемесі

*Жұмыстың мақсаты:* Алтай жотасының туристер көп жүретін маршрут бойындағы бүлінген топырақ ауыр металдармен ластанғанын тексеру.

**Ұсынылған болжамы:** Н1-Туристер жол қиыншылығына байланысты жоғарғы двигателді көліктерді пайдалануда, және одан бөлініп шыққан улы түтін, көліктің басқадай жабдық құралдары топырақты ауыр металдармен ластаған.

Зерттеу нысаны мен әдістері. Зерттеу нысаны ретінде жоғарыда анықтама берілген 2 маршрут бойындағы асфальтталмаған, ең көп тарамдалған 13–15 км шақырымдық 3 кординат таңдалып алынды.

Таңдалған аумақтағы жол бойынан ең көп тарамдалған жерінен төменде таныстырылған «конверт» әдістемесі бойынша 2–5 кординаттан сынама алынып, топырақтың құрамындағы хром(Сг), қорғасын (Pb), кадмий (Cd), мыс (Cu), мырыш (Zn), никель(Ni), қатарлы барлығы 6 элемент көлемі лабораторияда анықталды. Төмендегі суреттерден конверт методикасын қалай пайдаланғанын көруге болады.





2-сурет. Сынама алынған жерлер а) Қазақстан – Қаракөл 2021 шілде, б) Моңғолия – Бесбогда 2021 тамыз, в) Моңғолия – Бесбогда 2022 шілде

#### Нәтижелерді талдау

Таңдалған маршрут бойымен Моңғолияда 2022. 08.01–04 күндері экспедиция ұйымдастырып, топырақтың ауыр металдармен ластануын анықтау сынамасы Моңғол Алтайда ең көп талқандалған Бесбоғдаға көтерілетін соңғы 13 км жол бойынан алынды. Жол бойы барлығы 103 га алаң толығымен талқандалып, соңғы жылдары мүлдем шөп өспей қалған.

Ал Қазақстанда 2022.09.21–26 күндері экспедиция ұйымдастырып Қаракөлге көтерілетін жолдан 1 кординаттан, Рахман қайнарына көтерілетін жолдан 2 кординаттан алынды. Рахманға көтерілетін жол таудың бетіне салынғандықтан сынамалар жолдың етегінен, және үстінен алынды. Мұндада талқандалған алаңдар бар. Қаракөлге кететін жол сазды батпақты, тарамдалған 22 км. Мұнда шамамен 8,8 га алаң ерекше зақымдалған. Сынамалар осындай ерекше зақымдалған алаңдардан алынды.

Сынама кординаттарына сурет-2-де көрсетілгендей туристік көліктер топырақ қабатын толық зақымдаған, яғни биікке көтерілетін ең шеткі нүктелер



3-сурет. Топырақтан сынама алу а) Конверт амалын пайдалану, б) Қазақстаннан алынған сынамалардың бір бөлігі, в) Сынамалардың лабораторияға жеткізілуі

таңдалды. Себебі бұл жолдармен көліктер ауыр арамен жүріп, бензинді шала өртеп улы түтінді 2–3 есе көп бөліп шығарады.

Сынаманы «конверт» әдістемесі бойынша жолдың үстінен, жолдың екі жағынан 2 метрден, 5 метр қашықтықтан 1 кординаттан барлығы 5, Моңғол Алтайла барлығы 25 сынама. Казакстандық Алтайда 15 сынама алынды. Барлық сынамалар Улаанбаатар қаласындағы «Нарт» топырақ лабораториясында атом спектрометрін сіңіру амалдары (Царьская водка-Aqua-regia digestion (open beaker)) бойынша топырақтың құрамындағы барлығы 6 элемент көлемі анықталды (кесте 2). Өлшеуіш құрылғының толқын ұзындығы (длина волны λ = 190–900 нм), толқын ұзындығының нақтылығы ±0,15 нм, толқын ұзындығының жиілігі – 0,04 нм, анықтау шегі – 0,004 мг/кг. Толқын ұзындығы әр металда әр түрлі көрсеткішпен алынды. Хром (Cr -357,9 нм), қорғасын (Pb - 283,3 нм), кадмий (Cd -228,8 нм), Мыс (Cu - 324,7 нм), мырыш (Zn – 213,9 нм), никель (Ni – 232,4 нм).

Топырақтағы ауыр металдың стандартық мөлше-

рі Моңғолияның MNS 5546:2005 шифрлы «Топырақты ластаушы металдар, элементтердің рұқсат етілген жоғарғы мөлшері» стандарты [20] және Қазақстан республикасының Денсаулық министерінің 2021 жылы сәуірдің 21-күні бекітілген, ДСМ-32 номерлі «Қоршаған ортаның гигеналық нормативы», Қазақстан Республикасы Денсаулық сақтау, Қоршаған ортаны қорғау министрінің бірлескен бұйрығы бойынша 2004 жылғы 30 қаңтарда бекітілген, № 99/ № 21 номерлі «Топырақты ластайтын зиянды, зиянды микроорганизмдер және басқадай биологиялық заттардың рұқсат етілген концентрация норматив, стандарт»-ы бойынша салыстырылды [22–23].

Бесбоғда маңының топырағының физикалық құрамы (<0,01 мм) 30–35% болғандықтан саздыбатпақтылау топырақ екені анықталды. Моңғол Алтайдағы сынама алынған «Кординат-1,5» туристік машиналардың тұрағы. Мұндағы 1 га жуық аумақтың 4 шеті, ортасынан алынған топырақты жақсылап араластырып, тұрақтан 20 метр алыстан алынған таза топырақ көрсеткішімен салыстырылды.

2	T		) )	
2-кесте.	Топырактагы	ауыр	металоароын	ғ көлемі
		p		,

		Сынаманың құрамындағы ауыр металдар ( мг/кг)					
		Хром (Cr)	Қорғасын (Pb)	Кадмий (Cd)	Мырыш (Zn)	Мыс (Cu)	Никель (Ni)
Моңғолияның	Стандарттық мөлшері	100	70	1.5	150	80	100
Қазақстандық	Стандарттық мөлшері	6	32	-	23	3	4
	Моң	ғол Алтай					
Кординат 1	Жолдан 10 метр-таза топырақ (жолдың жоғарғы жағы)	19,0	16,7	0,0	42,0	30,2	10,4
	Жолдан 0 метр	17,3	13,9	0,0	42,7	31,0	9,1
	Жолдан 5 метр, (жолдың төменгі жағы)	29,3	20,5	0,0	59,1	28,5	43,3
Кординат 2	Жолдан 10 метр-таза топырақ (жолдың жоғарғы жағы)	19,2	17,7	0,0	42,8	35,5	8,6
	Жолдан 0 метр	20,7	22,2	0,0	50,6	47,0	22,9
	Жолдан 5 метр, (желдің төменгі жағы)	29,3	31,8	0,0	74,4	14,0	25,0
Кординат 3	Жолдан 10 метр-таза топырақ (жолдың жоғарғы жағы)	21,2	20,6	0,0	69,1	30,2	10,5
	Жолдан 0 метр	22,4	33,4	0,0	76,2	47,0	30,2
	Жолдан 5 метр, (жолдың төменгі жағы)	27,6	45,5	0,0	56,7	30,0	44,3
Кординат 4	Жолдан 10 метр-таза топырақ (жолдың жоғарғы жағы)	19,6	20,2	0,0	43,5	30.2	9,6
	Жолдан 0 метр	20,7	33,4	0,0	51,1	34.5	21,1
	Жолдан 5 метр, (жолдың төменгі жағы)	27,6	45,5	0,0	59,1	28.5	43,3
Кординат 5	Жолдан 10 метр-таза топырақ (жолдың жоғарғы жағы)	19.0	18,7	0,0	42,0	30,9	10,0
	Жолдан 0 метр	19.0	25,0	0,0	42,7	34,5	34,9
	Жолдан 5 метр, (жолдың төменгі жағы)	29.3	22,8	0,0	46,0	30,5	31,4
	Қазақсп	пандық Алт	aŭ				
Кординат 1	Жолдан 10 метр-таза топырақ (жолдың жоғарғы жағы)	23,0	18,7	0,0	51,0	34,2	12,4
Рахман	Жолдан 0 метр	21,3	16,7	0,0	49,1	30,0	13,6
	Жолдан 5 метр, (жолдың төменгі жағы)	29,3	34,5	0,0	57,1	41,5	23,3
Кординат 2	Жолдан 10 метр-таза топырақ (жолдың жоғарғы жағы)	26,6	23,2	0,0	54,7	38,2	13,6
Рахман	Жолдан 0 метр	28,7	25,6	0,0	58,3	39,0	17,1
	Жолдан 5 метр, (жолдың төменгі жағы)	29,6	35,5	0,0	60,4	44,8	33,3
Кординат 1	Жолдан 10 метр-таза топырақ (жолдың жоғарғы жағы)	24,1	22,1	0,0	52,8	35,9	12,8
Қаракөл	Жолдан 0 метр	29,0	24,3	0,0	51,9	36,2	14,7
	Жолдан 5 метр, (жолдың төменгі жағы)	34,3	42,8	0,0	56,0	38,5	21,4

Төмендегі графикта қызыл сызықпен Моңғолияның MNS 5546:2005 бойынша стандартық көрсеткіші, қара сызықпен Қазақстандық стандарты көрсетілген. Осы стандарттан асқанда қауіпті деңгейге жетті деп есептейді. Көк өңді жолақтарда таза топырақтағы, яғни ауыр металдардың қалыпты деңгейі көрсетілді. Ал қызыл сары жолақта жолдың үстінен алған сынамадағы ауыр метал деңгейі, сұры жолақта жолдың төменгі жағынан 5 метрден алынған топырақтағы ауыр метал деңгейі көрсетілді.

Моңғол Алтайдың таза топырағындағы *хромның* мөлшері 5 кординатта шамамен 19,0–21,2 мг/кг болса жолдың үстінде кей жерлерде 17,3–22,4 мг/кг. Ал жолдың төменгі жағынан 5 метр қашықтықта 27,6– 29,3 мг/кг. Яғни таза топырақтағы хромның мөлшерінен 8,1–8,6 мг/кг-мен көп. Бұл көрсеткіш Моңғолия стандары бойынша қауіпті деңгейге жетпегенімен, Қазақстан стандарты бойынша таза топырақтан алынған сынамадағы көрсеткіш 3 есе, жолдың үстін-







де 3–3,5 есе болса жолдың төмен жағында 4–4,8 есе көп, яғни аса қауіпті деңгейде. Бұл топырақ қабаты шайылу арқылы ауыр метал бір жерге жиналуының бір дәлелі.

Ал қорғасынның мөлшері таза топырақта 16,7– 20,6 болса, жол үстінде 13,9–25,0 мг/кг дейін әр түрлі деңгейде. Жолдың төменгі жағында 20,5–45,5 мг/кгга дейін жеткен. Тіпті кординат 3, 4-те таза топырақпен салыстырғанда 2 есе көп қорғасын табылды. Қазақстан стандарты бойынша жол үстінде *қорғасын* мөлшері кординат-3,4-те 1.4 мг/кг көп болса басқа кординаттарда қауыпты деңгейден төмен. Ал кординат 3 және кординат 4-те 13,5 мг/кг-ға көп. Бұл ауыр металмен ластану бар екенін көрсетеді. Мұнайдың құрамында болатын *кадмий* металы топырақтың құрамында кездеспеді. *Мырыштың* көрсеткіші таза топырақта 42,0–42,8 мг/кг болса, жолдың үстінде 42,7–76,2 мг/кг жеткен. Кординат-3-те мырыштың көлемі басқа кординаттармен салыстырғанда 2 есеге





### Жолдан 5 метр, (жолдың төменгі жағы)

Моңғолия стандарты

—— Қазақстан стандарты

4-сурет. Моңғол Алтайдағы топырақтағы ауыр металдың денгейі, мг/кг көп болды. Ал кординат-2-де мырыш қалыпты деңгейден 31,6 мг/кг көбейіп, Моңғолия стандары бойынша 2 есе, Қазақстан стандарты бойынша 3.5 есе ластанған. Жәнеде кординат-1-де 17,1 мг/кг, кординат-4-те 15,6 мг/кг-ға көбейген. Барлық 5 кординаттағы көрсеткіштер Моңғолия стандары бойынша қауіпті деңгейге жетпегенімен Қазақстан стандарты бойынша қауіпті деңгейден 1–3,5 есеге дейн асып кеткен.

*Мыстың* мөлшері таза топырақта 30,2–30,9 мг/кг болса, жолдың үстінде 0,8–17,0 мг/кг-ға дейін өскен. Алайда жолдың төменгі жағында кординат-2-де 14 мг/кг-да дейін түсіп кеткен. Мыс металы жолдың жиегі емес жолдың үстіне жиналғаны байқалады. Яғни жолдың үстіндегі мыстың деңгейі Қазақстан стандарты бойынша барлық кординатта 9–16 есе асып кеткен.

Мұнда ең көп топырақты ластаған ауыр металдың түрі *никель* болып отыр. Таза топырақта никелдің мөлшері 8,6–10,4 мг/кг болғанымен жол үстінде 21,1–34,9 мг/кг-га (Кординат-1-ді есептемегенде) жетіп, қалыпты мөлшерден 2–3 есеге көбейген. Ал жолдың төменгі жағында 16,1–33,7 мг/кг, яғни 2–4 есеге дейін жетеді. Бұл көрсеткіш Моңғолия стандары бойынша қауіпті деңгейге жетпегенімен, Қазақстан стандарты бойынша қауіпті деңгейден 2–11 есе көп.

Сынама алынған 5 кординатта да хром (Сг), қорғасын (Рb), мырыш (Zn), никель (Ni) мөлшері қалыпты деңгейден сәл немесе 2–4 есе жоғары екені, олардың көбісі жолдың төменгі жағында жиналған. Жолдан 5 метр дегеніміз өсімдік қабаты ешқандай зақымдалмаған жерлерден алынғандықтан көліктер арқылы түскен ауыр металдар қар суларының еріп ағу салдары, желдің әсерінен жолдарда түскен ауыр металдар шайылып, жолдың төменгі жағында ауыр металдың мөлшері кемінде 2,1 мг/кг-ға, көп дегенде 34,2 мг/кг-ға өскен.



Қазақстандық Алтайдағы 3 кординаттан алынған сынама бойынша төмендегі мәліметтер белгілі болды.

Мұнда да кадмий металы табылмады. Рахман қайнарына баратын жол бойынан алынған 2 кординатта хромның мөлшері 23–26,6 мг/кг болса жол үстінде 21,3–28,7 мг/кг, яғни қалыпты деңгейде. Ал жолдың төменгі жағында қалыпты нормадан 3,3– 6,3 мг/кг көп. Мұны Қазақстан стандарты бойынша алып көрсек 3,5–5 есеге көбейген, аса қауіпті деңгейде. Мырыштың көлемі 51,0–54,7 мг/кг, кординат-1де сәл азайып, 49,1 мг/кг түссе, кординат 2-де 58,3 мг/кг, жолдан төмен 60,4 мг/кг жеткен. Мыстың мөлшері таза топырақта 34,2–38,2 мг/кг болса, жолда 30,0–39,0, жолдан төмен сәл өсіп 41,5–44,8 мг/кг-ге жетеді. Бұл мұнда да ауыр металдар шайылып жинақталу бар екенінің дәлелі.

Ал қорғасын мөлшері таза топырақта 18,7-23,2 мг/кг-ға жетсе, жолдың үстінде 25,6 мг/кг, жолдан төмен 2 есеге, яғни 12,5–15,8 мг/кг-ға көбейген. Қазақстан стандарты бойынша жолдын төменгі жағы қорғасынмен ластану нақты бар деп көруге болады. Никелдің мөлшері таза топырақта 12,4-12,8 мг/кг болса, жолдың үстінде 14,7–17,1 мг/кг-ға көп. Ал жолдын астында 23,3-33,3 мг/кг жеткені ластану бар екенін көрсетеді. Топырақтың қорғасынмен улануы Рахман қайнарында да, Қаракөлде де байқалады. Қаракөлде никелдің мөлшері жолдың төменгі жағында 7,4 мг/кг-ге артқан. Ал мыс, мырыштың, хромның мөлшері қалыпты нормада болғанымен, жолдың төменгі жағында шайылып жиналғандығы байқалады. Алайда Қазақстандық стандарт бойынша алып көрсек барлық ауыр металдар мөлшері ең аз дегенде 3,5-5 есеге көбейген, «қауіпті» деңгейден 16 есеге дейін асып кеткені бар.

Жалпылама алып көргенде Моңғол Алтайда да, Қазақстандық Алтайда туризм әсерінен топырақтағы қорғасын, никелдің мөлшері 2–4 есеге артқан. Ал кадмий элементі мүлдем кездеспеді. Басқадай хром, мыс, мырыш қатарлы ауыр металдың мөлшері аздап артқан, және жолдың төменгі жағына жиналған.

Қазақстанда да Моңғолда да бұл аумаққа 300 шақырымның ішінде ешқандай тау кендер өндірісі, металлургия заводы жоқ. Жәнеде бұл жерлер отырықты жерлерден 60–120 шақырым екенін ескерсек, мұнда ауаны, топырақты ластаушы тек автокөліктер ғана болып отыр. Және ауаны, топырақты ластайтын ірі курорттарда жоқ.

Сондықтан мұндағы топырақтағы кейбір ауыр металдардың денгейі 5 жылда 2–4 есе артқаны «тікелей туристік көліктерге байланысты ауыр металмен ластанған» деп шүбәсіз айта аламыз.

Мұндағы қорғасында Моңғолия, Қазақстанда көп керектенетін арзан, экологиялық таза емес бензиндер кұрамында болады. А80 бензиннің құрамында 0,17 г/л, А93 – 0,37 г/л қорғасын болады [21, р. 36]. Ал мұнда туристерге қызмет көрсетушы көліктердің көбісі А80 бензинін керектенетін УАЗ машиналары,

немесе А93 керектенетін қуатты көліктер. Жоғарғы қуатпен баяу жүру ол бензин шала өртеліп, улы газдардың тіптен мол бөлінуіне әсер етеді. Сағатына 31,7 км жылдамдықпен жүрген көлік 1,11 г/сағ немесе 0,035 г/км қорғасын бөліп шығарады. Мырыш электр батареяларында көптеп кездеседі [16, р. 64]. Ал Моңғолияда машиналарды бояу, замаскалауға никельді қоспаларды көптеп қолданады. Сондықтан мұндағы ауыр элементтер тікелей автокөліктер арқылы топыраққа түскен.

Бұл жолмен тек шілде тамыз айларында туристер көп жүргенін, жәнеде қар, жауын суларына ағып шайылып кеткенін ескерсек осылай жалғаса берсе мұндағы ластану алдағы 4–5 жылда стандарттық көрсеткіштен асып, қауыпті деңгейге жететінін болжауға болады.

### Қортынды

Туризм көліктері әсерінен топырақ қабаты ауыр металмен ластанған болуы мүмкін деген гипотеза бойынша Моңғолияда 2022 жылы Тамыз айында, Қазақстанда 2022 жылы қыркүйек айында арнайы экспедиция ұйымдастырып барлығы 8 кординаттан «конверт» әдістемесі бойынша 40 сынама алынып, оның 24-і лабораторияда тексерілді. Атом спектрометрін сіңіру әдістемесі бойынша құрамындағы хром(Сг), қорғасын (Рb), кадмий (Сd), мыс (Сu), мырыш (Zn), никель(Ni) қатарлы 6 элемент көлемі анықталды.

Нәтижесінде Моңғол Алтайдағы туризм әсерінен топырақтың беткі қабаты туристік көліктерден бөлініп шығатын түтіндер арқылы аз мөлшерде ластанып жатқаны анықталды. Мұнда жолдың төменгі жағына жиналған топырақпен салыстырғанда хром (Сr) — 6,4–8,1, қорғасын (Pb) — 0,1–24,9, мыс (Сu) — 0,7– 5,1, мырыш (Zn) — 0,8–11,5, никель (Ni) — 21,1– 34,9 мг/кг-мен жоғары. Топырақ бедері қар, жауын суына шайылу салдарынан ауыр металдардың мөлшері өзгергені анық байқалады. Жалпысы 3 кординатта қорғасын 2–3 есе, 2 кординатта мырыш 2 есе, 4 кординатта никель 2–4 есе көбейген.

Рахман қайнары, Қаракөлдегі сынамаларда да қорғасын таза топырақпен салыстырғанда 12,5– 15,8 мг/кг-ға, яғни 2 есеге көбейген. Ал никелдің мөлшері таза топырақтан 8,6–16,2 1 мг/кг-ға көбейген. Қаракөлде никелдің мөлшері жолдың төменгі жағында 7,4 мг/кг-ге артқан. Ал мыс, мырыштың, хромның мөлшері қалыпты нормада болғанымен, жолдың төменгі жағында шайылып жиналғандығы байқалады.

Бұл көрсеткіш Моңғолия стандары бойынша қауіпті деңгейге жетпегенімен, никелдің деңгейі Қазақстан стандарты бойынша қауіпті деңгейден ең аз дегенде 2–3 есе көп, ең көп дегенде 10–16 есе көбейіп «аса қауіпті» деңгейдің ұстынде тұр.

Қазақстанда да Моңғолда да бұл аумаққа 300 шақырымның ішінде ешқандай тау кендер өндірісі жоқ болғандықтан ластаушы тікелей туризм көліктері ғана деп нақты айта аламыз. Өйткені туристік көліктер батпақты кешіп өту, биікке көтерілу, яғни жаман жолдармен жоғарғы қозғалтқышпен баяу жүруде топырақты көбірек ластайтыны белгілі болды.

Сондықтан топырақтың ауыр металмен ластануын тоқтату үшін батпақты жолдар, биікке көтерілетін жолдарға тосқауыл қою, ең алдымен мұздықтар, мұз өзендеріне көлікпен жақындап баруға тыйым салу қажет. Жалпылама алғанда Туризмнын зиянын азайтудың немесе мүлдем болдырмаудың жалғыз жолы барлық жолды асфальттау, немесе аспалы жолға айналдыру. Алайда бұл экономикалық жағынан өте көп қаржыны қажет ететіні белгілі. Сондықтан ең алдымен туристік маршруттар бойындағы жолдардың тарамдалуына жол бермеу, туристік көліктердің бей-берекет жолдар шығаруына жол бермеу арқылы топырақ қабатының ластануын тоқтата аламыз. Мысалы. Моңғол Алтайдағы Бесбоғда тауының етегіндегі Президент обасына баратын 13 км жолмен машина жүруді тоқтатып, туристерге ат, түйемен саяхаттауға мүмкіндік жасауға болады. Ал Қазақстан Алтайындағы Рахман қайнарына көлікпен көтерілудің орнына аспалы жолпен көтерілсе Алтайдың әсем табиғатын, Белуха шыңын биіктен көруге мүмкіндік туар еді. Әрине басқадай туристік инфрақұрылымды жақсарту арқылы ластану, топырақ қабатынының зақымдануында азайтуға болады.

#### ПАЙДАЛАНЫЛҒАН ӘДЕБИЕТТЕР

- Aizen E.M., Aizen V. B., Melack J. M., Nakamura T., Ohta T. Precipitation and atmospheric circulation patterns at mid-latitudes of Asia // Journal of Climatology. – 2001. – 21 (5). – P. 535–556. https://doi.org/10.1002/joc.626
- Braden K.A., and Prudnikova N.B.. The challenge of ecotourism development in the Altay Region of Russia // Tourism Geographies. – 2008. – 10 (1). – 1–21. https://doi.org/10.1080/14616680701825107
- UNDP & GEFG of Russian Federation: Biodiversity Conservation in the Russian Portion of the Altai-Sayan Ecoregion / United Nations Development Programme (UNDP). – 2011. Ministry of Natural Resources (MNR) of the Russian Federation. PDF fail, 14.
- 4. Ердавлетов.С.Р. Туризм Казахстана: учебное пособие. – Алма-ата. – 1989. ISBN 5-620-00199-7.
- Моңғолия Үкіметі :Моңғолия Үкіметінің 1996 жылғы №- 167 қаулысы, Моңғолияда Туризмды дамыту үшін 1995-2005 жылы атқарылатын жұмыстардың негізгі бағыты. / Улаанбаатар. – 1996. https://legalinfo.mn/mn/ detail?lawId=200886&showType=1
- Моңғолия Ұлы Құрылтайы: Моңғолия Республикасының тұрақты даму тұжырымдамасы-2030. – Улаанбаатар. – 2016. https://legalinfo.mn/mn/detail?lawId= 207105&showType=1
- Моңғолия Ұлы Құрылтайы: «Алсын Хараа-2050» Моңғолия Республикасының даму жоспары. // Моңғолия Ұлы Құрылтайы. – Улаанбаатар. – 2020.
- Chlachula J.A., Zhensikbayeva N.Z., Yegorina A.V., Kabdrakhmanova N.K., Czerniawska J., Kumarbekuly S. Territorial assessment of the East Kazakhstan geo/ecotourism: Sustainable travel prospects in the Southern Altai area // Geosciences (Switzerland) (MDPI AG). – 2021. –

11 (4). – P. 5. https://doi.org/10.3390/geosciences 11040156

- JICA&MTD: The Master Plan on National Tourism Development in Mongolia // Padeco Co., Ltd. Nippon Koei Co., Ltd, Ulaanbaatar: JICA – 1999. – P. 192.
- 10. Моңғолия Шекара Басқармасы :Алтай Бесбоғда ұлттық паркіне саяхаттау үшін шекаралық зонаға кіруге рұқсат алған туристер, машиналар айлық статистикасы, (2016-2022) / Моңғолия Шекара Басқармасының 2023 жылдың 12-нші Желтоқсан күнгі No 2a/2518 хаты бойынша.
- Қазақстан Республикасы Ұлттық статистика бюросы: Қазақстанның курорттық аймақтары бойынша ішкі туризмның негізгі көрсеткіштер (4 курорттық аймақтың қосындысы). https://stat.gov.kz/official/industry/ 22/statistic/6
- Valeria Memoli., Esposito F., Speranza C Panico Evaluation of tourism impact on soil metal accumulation through single and integrated indices // Science of The Total Environment. – 2019. – 2 (682). https://doi.org/10.1016/ j.scitotenv.2019.05.211
- Qifa Sun Zhuoan., Sun Jianheng Wang., Wei Zhu. Heavy metal pollution and risk assessment of farmland soil in eco-tourism resort // Arabian Journal of Geosciences. – 2022. – 6 (15). – P. 156. https://doi.org/10.1007/s12517-022-09798-6
- 14. Jinying Xu., Xiaolong Wang., Jingbo Wang., Chunhua Hu. Dominant environmental factors influencing soil metal concentrations of Poyang Lake wetland: China Soil property, topography plant species and wetland type // Catena – 2021. – 207(4):105601. – 4 (204). https://doi.org/10.1016/j.catena.2021.105601
- 15. St Fatimah Azzahra., Faradiba Faradiba. Impact of Soil Pollution on Increasing Temperature in Indonesia // Asian Journal of Advanced Research and Reports. – 2019. https://doi.org/10.9734/ajarr/2021/v15i730412
- 16. Оразбаев Ә.Е. Экотоксикология: оку құралы. Қарағанды : АҚНҰР. 2017. ISBN 978-601-7894-55-9
- 17 Абсеитов Е.Т., Масенов Қ.Б., Айтлесов Қ.К. Өнеркәсіптік экология : оқу құралы. – Алматы: Нур-Принт. – 2018. ISBN 978-601-206-064-5
- 18. Singh Jiwan., Kalamdhad Ajay. Effects of Heavy Metals on Soil, Plants // Human Health and Aquatic Life. International Journal of Research in Chemistry and Environment. – 2011. – 2 (1). – P. 15–21. (PDF) Effects of Heavy Metals on Soil, Plants, Human Health and Aquatic Life (researchgate.net)
- Chang Zhang, Shuang Nie, Jie Liang, [et. al.] Effects of heavy metals and soil physicochemical properties on wetland soil microbial biomass and bacterial community structure // Science Total Environment. – 2016. – 1 (557-558). – P. 785–790. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.01.170
- General requirements for assessment of soil erosion and degradation of vegetation cover in pasture lands / Department of Standards and Metrologies of Mongolia: MNS 5546:2005 / Ulaanbaatar – 2005. https://estandard.gov.mn/ standard/reader/5010?fbclid=IwAR2juuIVtosS-n1mGJO gdCXYCMjBWmxorpqQh3tCA46t8UhHOgrHLiPO\_vs#0 -mcyawnbvxtjphwed.jpg
- Сабралиев Н.С, Рғызбаева Н.Т, Нұрланқызы Ұ. Қоршаған ортаны автокөліктердің зиянды шығарындыларынан қорғау. – Алматы: ЖШС Лантер Трейд. – 2021. ISBN 978-601-7607-99-9

- 22. Приказ Министра Здравоохранения Республики Казахстан от 21.04.2021 № КР ДСМ-32 «Об утверждении Гигиенических нормативов к безопасности среды обитания».
- 23. Приказ Министра Здравоохранения Республики Казахстан «Об утверждении Нормативов предельно допустимых концентраций вредных веществ, вредных микроорганизмов и других биологических веществ, загрязняющих почву» / Совместный приказ МЗ РК от 30.01.04 № 99 и МООС РК от 27.01.04 № 21-П.

### References

- Aizen E.M., Aizen V. B., Melack J. M., Nakamura T., Ohta T. Precipitation and atmospheric circulation patterns at mid-latitudes of Asia // Journal of Climatology. – 2001. – 21 (5). – P. 535–556. https://doi.org/10.1002/joc.626
- Braden K.A., and Prudnikova N.B.. The challenge of ecotourism development in the Altay Region of Russia // Tourism Geographies. – 2008. – 10 (1). – 1–21. https://doi.org/10.1080/14616680701825107
- UNDP & GEFG of Russian Federation: Biodiversity Conservation in the Russian Portion of the Altai-Sayan Ecoregion / United Nations Development Programme (UNDP). – 2011. Ministry of Natural Resources (MNR) of the Russian Federation. PDF fail, 14.
- 4. Erdavletov.S.R. Turizm Kazakhstana: uchebnoe posobie. – Alma-ata. – 1989. ISBN 5-620-00199-7.
- Mońgolua Úkimeti :Mońgolua Úkimetiniń 1996 jylgy №-167 qaýlysy, Mońgoluada Týrızmdy damytý úshin 1995-2005 jyly atqarylatyn jumystardyń negizgi bagyty. / Ýlaanbaatar. – 1996. https://legalinfo.mn/mn/detail? lawId=200886&showType=1
- Mońgolua Uly Quryltary: Mońgolua Respýblikasynyń turaqty damý tujyrymdamasy-2030. – Ýlaanbaatar. – 2016. https://legalinfo.mn/mn/detail?lawId=207105& showType=1
- Mońgolna Uly Quryltany: «Alsyn Haraa-2050» Mońgolna Respýblikasynyń damý jospary. // Mońgolna Uly Quryltany. – Ýlaanbaatar. – 2020.
- Chlachula J.A., Zhensikbayeva N.Z., Yegorina A.V., Kabdrakhmanova N.K., Czerniawska J., Kumarbekuly S. Territorial assessment of the East Kazakhstan geo/ecotourism: Sustainable travel prospects in the Southern Altai area // Geosciences (Switzerland) (MDPI AG). – 2021. – 11 (4). – P. 5. https://doi.org/10.3390/geosciences 11040156
- JICA&MTD: The Master Plan on National Tourism Development in Mongolia // Padeco Co., Ltd. Nippon Koei Co., Ltd, Ulaanbaatar: JICA – 1999. – R. 192.
- 10. Mońgolna Shekara Basqarmasy :Altai Besbogda ulttyq parkine saiahattaý úshin shekaralyq zonaga kirýge ruqsat algan týrister, mashinalar ailyq statistikasy, (2016–2022) / Mońgolna Shekara Basqarmasynyń 2023 jyldyń 12-nshi Jeltoqsan kúngi No 2a/2518 haty boiynsha.
- Qazaqstan Respýblikasy Ulttyq statistika biýrosy: Qazaqstannyń kýrorttyq aimaqtary boiynsha ishki týrizmnyń negizgi kórsetkishter (4 kýrorttyq aimaqtyń qosyndysy). https://stat.gov.kz/official/industry/ 22/statistic/6

- Valeria Memoli., Esposito F., Speranza C Panico Evaluation of tourism impact on soil metal accumulation through single and integrated indices // Science of The Total Environment. – 2019. – 2 (682). https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.05.211
- 13. Qifa Sun Zhuoan., Sun Jianheng Wang., Wei Zhu. Heavy metal pollution and risk assessment of farmland soil in eco-tourism resort // Arabian Journal of Geosciences. 2022. 6 (15). P. 156. https://doi.org/10.1007/s12517-022-09798-6
- 14. Jinying Xu., Xiaolong Wang., Jingbo Wang., Chunhua Hu. Dominant environmental factors influencing soil metal concentrations of Poyang Lake wetland: China Soil property, topography plant species and wetland type // Catena – 2021. – 207(4):105601. – 4 (204). https://doi.org/10.1016/j.catena.2021.105601
- 15. St Fatimah Azzahra., Faradiba Faradiba. Impact of Soil Pollution on Increasing Temperature in Indonesia // Asian Journal of Advanced Research and Reports. – 2019. https://doi.org/10.9734/ajarr/2021/v15i730412
- Orazbaev Á.E. Ekotoksikologiia: oqý quraly. Qaragandy: AQNUR. – 2017. ISBN 978-601-7894-55-9
- 17 Abseitov E.T., Masenov Q.B., Aitlesov Q.K. Ónerkásiptik ekologiia : oqý quraly. – Almaty: Nýr-Print. – 2018. ISBN 978-601-206-064-5
- 18. Singh Jiwan., Kalamdhad Ajay. Effects of Heavy Metals on Soil, Plants // Human Health and Aquatic Life. International Journal of Research in Chemistry and Environment. – 2011. – 2 (1). – R. 15–21. (PDF) Effects of Heavy Metals on Soil, Plants, Human Health and Aquatic Life (researchgate.net)
- Chang Zhang, Shuang Nie, Jie Liang, [et. al.] Effects of heavy metals and soil physicochemical properties on wetland soil microbial biomass and bacterial community structure // Science Total Environment. – 2016. – 1 (557-558). – R. 785–790.
- https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.01.170 20. General requirements for assessment of soil erosion and degradation of vegetation cover in pasture lands / Department of Standards and Metrologies of Mongolia: MNS 5546:2005 / Ulaanbaatar – 2005. https://estandard.gov.mn/ standard/reader/5010?fbclid=IwAR2juuIVtosS-n1mGJO gdCXYCMjBWmxorpqQh3tCA46t8UhHOgrHLiPO\_vs#0 -mcyawnbvxtjphwed.jpg
- Sabralıev N.S, Rýyzbaeva N.T, Nurlanqyzy U. Qorshagan ortany avtokólikterdiń znandy shygaryndylarynan qorgay.
   Almaty: JShS Lanter Trend. – 2021. ISBN 978-601-7607-99-9
- Prikaz Ministra Zdravookhraneniya Respubliki Kazakhstan ot 21.04.2021 No. KR DSM-32 "Ob utverzhdenii Gigienicheskikh normativov k bezopasnosti sredy obitaniya".
- 23. Prikaz Ministra Zdravookhraneniya Respubliki Kazakhstan "Ob utverzhdenii Normativov predel'no dopustimykh kontsentratsiy vrednykh veshchestv, vrednykh mikroorganizmov i drugikh biologicheskikh veshchestv, zagryaznyayushchikh pochvu" / Sovmestnyy prikaz MZ RK ot 30.01.04 No. 99 i MOOS RK ot 27.01.04 No. 21-P.

### ВЛИЯНИЕ ТУРИЗМА НА ЗАГРЯЗНЕНИЕ ПОЧВ ТЯЖЕЛЫМИ МЕТАЛЛАМИ АЛТАЙСКОГО ХРЕБТА

#### Е.Б. Баделгажы, Б.А. Капсалямов, Ж.Б. Тусупова

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

В статье представлены сведения о загрязнении почв тяжелыми металлами в результате туризма в Горном Алтае Казахстана и Горном Алтае Монголии. В период пандемии Covid-19 путешествия в Горный Алтай стали трендом внутреннего туризма в обеих странах. Из-за слабого развития здесь инфраструктуры, туристический транспорт нанес ущерб поверхности почвы, скользя по грунтовым дорогам, проезжая по болотистой местности, строя новые ответвления, приближаясь к заснеженным вершинам. Авторы предположили, что почва, вероятно, загрязнена тяжелыми металлами, в основном из-за большегрузных автомобилей с большими двигателями. В результате отбор проб почвы показал, что по сравнению с чистой почвой содержание свинца увеличилось на 12,5–15,8 мг/кг, никеля на 16,1–33,7 мг/кг, цинка на 15,6–17,1 мг/кг и в целом количество тяжелых металлов возросло в 2–4 раза. Результаты эксперимента подтвердили наличие загрязнения тяжелыми металлами нарушенной почвы. Но это загрязнение не превысило нормативный уровень, потому, что загрязненые почвы смываются снегом и дождем.

**Ключевые слова:** Казахстанский Алтай, Монгольский Алтай, горный хребет, туризм, автомобили, загрязнение почв, тяжелые металлы.

## HEAVY METAL POLLUTION FROM TOURISM IN THE ALTAI MOUNTAINS

#### E.B. Badelgazhy, B.A. Kapsalyamov, Zh.B. Tusupova

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

The paper presents information about soil pollution with heavy metals from tourism in the Altai Mountains of Kazakhstan and the Altai Mountains of Mongolia. During the pandemic, traveling to the Altai Mountains became a trend became trend for domestic tourism in both countries. Bad infrastructure is here. Therefore, tourist vehicles have damaged the surface of the soil by driving on dirt roads, building new branch roads, approaching snow-capped peaks, and driving through swampy areas. The authors hypothesized that the soil is likely to be contaminated with heavy metals, mostly due to heavy vehicles with large motors. As a result, compared to clean soil, the lead levels increased by 12.5–15.8 mg/kg, nickel for 16.1–33.7 mg/kg, zinc for 15.6–17.1 mg/kg and the amount of heavy metals increased by 2–4 times. The results of the experiment confirmed the presence of heavy metal contamination in disturbed soil. But this pollution has not exceeded the standard level. Because contaminated soils are washed away by snow and rain.

Keywords: Altai of Kazakhstan, Mongolian Altai ridge, tourism, vehicles, soil pollution, heavy metals.

#### <u>https://doi.org/10.52676/1729-7885-2023-1-25-39</u> УДК 669.017.15:621.793.02

# **OVERVIEW OF THE HIGH-ENTROPY ALLOYS CONCEPT**

Ye.Ye. Kambarov<sup>1,2)</sup>, G.K. Uazyrkhanova<sup>1)</sup>, M. Rutkowska-Gorczyca<sup>3)</sup>, A.Ye. Kussainov<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup> Daulet Serikbayev East Kazakhstan Technical University, Ust-Kamenogorsk, Kazakhstan
 <sup>2)</sup> Nazarbayev Intellectual School of Chemistry and Biology in Ust-Kamenogorsk, Ust-Kamenogorsk, Kazakhstan
 <sup>3)</sup> Wroclaw University of Science and Technology, Wroclaw, Poland

E-mail for contacts: yedilzhan@gmail.com

The article presents a review of the results of research on high-entropy alloys, describing the principles of their formation, the basic concepts and properties of high-entropy alloys. The existing categories of the entropic alloys are listed. The effects resulting from the formation of high-entropy alloys are described: high entropy, lattice distortion, sluggish diffusion and cocktail effects. It is noted that the traditional thermodynamic representations for multicomponent alloys require additions. It is also noted that the application of Hume-Rothery rules to predict the phase composition of high-entropy alloys shows some difficulties, since it is difficult to select a large number of elements having the same type of lattice and valence. The results of the analysis of a number of parameters and conditions which, according to the researchers' opinion, affect the structural state created by high-entropy alloys, taking into account which could allow to correctly predict the formation of structures in high-entropy. Analysis of the literature data has shown that at present there is no universal parameter that could allow the correct prediction of the formation of structures in multicomponent alloys systems. Methods for the preparation of powders of high entropy alloys are presented. The results of frequently used methods of obtaining coatings on the basis of high-entropy alloys, such as laser cladding, magnetron sputtering, electrochemical deposition and thermal spraying are reviewed. Disadvantages of obtaining coatings methods are described.

Keywords: high-entropy alloys, multicomponent alloys, thermodynamics, structure, coatings methods.

#### **1** INTRODUCTION

Over the past 20 years, the development of theories and technologies in the field of new materials has moved toward the use of many elemental alloys. This class of metallic compounds is called high-entropy alloys (HEA). HEA have properties such as high corrosion resistance [1, 2], high wear resistance [3] and specific mechanical properties [4, 5], which are optimal in heavy (aggressive) operating conditions [6]. CrMnFeCoNi-based HEA (Cantor alloys) [7], CoCrNi-based medium-entropic alloys [8, 9], CoCrFeNb eutectic HEA [10], CoCrFeNiTiAl alloys [11], HfMoNbTiTiZr [12] and TiZrNbWMo [13] are mainly being studied. These new alloys are also known as multicomponent alloys or alloys with several major elements, which differ from traditional alloys containing one major element, such as alloys of Al, Cu, Fe, Ti, etc. HEA are mainly composed of five or more elements in equiatomic or nonequiatomic ratios, where the composition of each element varies from 5 to 35 at.% [14]. Mixing of elements in this composition yields simple solid solution phases such as face-centered cubic (FCC), body-centered cubic (BCC), and hexagonal close packed (HCP) structures [7]. HEA were believed to possess exceptional characteristics, such as high mixing entropy, lattice distortion, delayed diffusion and cocktail effect, which account for their high mechanical strength, resistance to high temperature, wear resistance and corrosion resistance. Current researches on high entropy alloys is focused on microstructure evolution, hardness prediction, the effect of HEA nanoparticles on the efficiency of high-performance lithium-ion batteries, the mechanical properties of eutectic HEA, and the use of machine learning to predict HEA phase formation by composition. as well, work is underway to investigate transition metals (TM HEA) are considered to be promising structural materials for hightemperature (HT) applications. Nevertheless, their hightemperature oxidation is a critical problem and needs to be addressed for hot components. Therefore, HEA have exciting potential in various engineering structures [15– 18]. However, the excessive cost of the elements of these systems limits their use in large-sized equipment and components. The application of surface coating technology effectively reduces the cost of production and maintenance of large equipment.

HEA-based coatings have become a potential surface protector because of their high surface protection capabilities [19]. In recent years, there have been tremendous changes in the methods used to produce HEA-based coatings and applications. This review focuses on the basic understanding of HEA and related HEA concepts, and summarizes the main problems associated with the development of HEA coatings, offering system-level recommendations for future research in this area.

Previously published reviews considered separately the basic properties, characteristics of HEA and the ability to form HEA phases (BCC, FCC, HCP, amorphous and multiphase) by entering five calculated parameters, (*VEC*,  $\Delta \chi$ ,  $\delta$ ,  $\Delta H_{mixture}$  and  $\Delta S_{mixture}$ ). This review article systematizes the data of previous reviews, discusses the current methods for producing HEA powders and the characteristics of the possessing coatings based on them. This review article is the basis for the dissertation work, which will investigate the phase formation of HEA obtained by mechanical alloying at certain temperature regimes.

#### 2.1 Formation of HEA

In order to achieve the necessary properties, researchers are developing new composite alloys. One of the ways to achieve such objectives is the concept of increasing thermodynamic entropy by increasing the number of components taken in certain proportions. Therefore, these alloys are called high entropy alloys.

Existing metallurgical knowledge and binary/triple phase diagrams suggest that such multi-element alloys can form several tens of phase types and intermetallic compounds, resulting in complex and brittle microstructures that are difficult to analyze and design, and likely have extremely limited practical value. The main feature of HEA is the formation of a single-phase stable thermodynamically stable solid solution. Stabilization of the solid solution is provided by high entropy of mixing of components in initial and liquid states. The entropy of mixing, or also called thermodynamic entropy, for pure elements depends only on the vibrational (thermal) motion of atoms. And in the cases of alloys, in addition to the vibrational motion of the atoms, the entropy of mixing is composed of the configuration, magnetic, and electronic components [20]. An increase in the number of components leads to an increase in configurational entropy. And based on the Boltzmann hypothesis, an increase in the configurational entropy of the alloy, both in the liquid and in the solidified state, contributes to the formation of a simple structure of a single-phase disordered solid substitution solution. In [21] it is reported that configurational entropy really favors the solid solution phases in comparison with the classical thermodynamic concepts, based on which the state of the system is determined through density, pressure, temperature and other local thermodynamic parameters.

In general, the HEA concept has expanded into three categories (Table), such as alloys with high entropy (from five elements up to thirteen), alloys with medium entropy (three or four basic elements) and alloys with low entropy (less than three basic elements) [22, 23].

 Table. Classification of HEA according to their constituent
 elements [24]

Alloys	Number of elements	Examples
High entropy alloys	5 ≤ <i>n</i> ≤ 13	AlCoCrFeMnNi, CoCrFeMnNi, AlCrCuFeNi, MoNbTaW
Medium entropy alloys	3 ≤ n < 5	CoCrNi, CoCrFeNi
Low entropy alloys	1 ≤ <i>n</i> < 3	AlMg, AlCu, NiCo

Due to the considerable number of elements that set the composition of the matrix, to describe the HEA consider the factors of influence on the microstructure and properties of the alloys. HEA has four effects, [14, 25, 26] which are less pronounced in conventional alloys, in the literature they are called "core effects". The core effects that are observed during the formation of HEA are: high entropy, lattice distortion, sluggish diffusion and mixing effect (the "cocktail" effect) [14]. Three of them are hypotheses, and the mixing effect is a separate characteristic of the HEA.

The high entropy effect. High entropy effect. The high entropy effect is a distinctive feature of HEA, and it is assumed that the increased configuration entropy in nearly equimolar alloys with five or more elements may favor solid solution phases and prevent the formation of intermetallic compounds. According to Gibbs' rule of phases in a five-element system, the number of phases in the alloy at constant pressure and temperature should be six equilibrium phases. However, HEA form a singlephase solid solution, which contradicts Gibbs' rule of phases. A solid solution, in terms of thermodynamics, forms at the minimum Gibbs free energy. Based on the Gibbs free energy equation (2), high entropy reduces the Gibbs free energy, thereby contributing to the stabilization of the solid solution and preventing the formation of intermetallic phases during crystallization [27, 28].

There is much evidence for the high entropy effect [27, 29–34]. Figure 1 shows a diffractogram of a multicomponent alloys obtained by sequentially adding an additional element, with an increase in the number from two to seven components. Multicomponent systems form solid solutions with FCC and BCC structure, which is contrary to common expectations: the formation of various kinds of binary/triple compounds [35].



Figure 1. Diffractogram of multicomponent alloys obtained by sequential addition of an additional element [35]

*The lattice distortion effect.* The HEA crystal lattice consists of different elements, hence having different atomic radii. During the formation of an HEA, each atom has an equal probability of occupying one or another node of the crystal lattice, which leads to a serious distortion of the lattice. Since the size of the atoms in the HEA lattice differs from each other, the formation of a solid solution is accompanied by a distortion of the crystal lattice. The displacement of an atom in each node of the lattice leads to an indeterminate position of the atoms, hence the configuration entropy increases.

A schematic illustration of the effect of lattice distortion on the intensity of X-ray diffraction peaks is shown in Figure 2. The heterogeneity of the constituent elements significantly reduces the degree of crystallinity and X-ray scattering, which leads to an anomalous decrease in the height of the peaks [36]. Lattice distortion prevents the movement of dislocations and leads to a pronounced solid-solution hardening, as well as a decrease in electrical and thermal conductivity due to increased scattering of electrons and phonons. It is known that temperature changes affect the oscillation of atoms; when the temperature increases, the amplitude of oscillations increases, which leads to a decrease in the intensity of the reflected X-rays [37- 39]. A similar phenomenon is observed in the deformation of the crystal lattice, leading to the distortion of atomic planes. However, it is worth noting that when the number of components increases, the diffraction peak height decreases markedly more intensely than for the thermal effect (Figure 1,2).



Figure 2. Schematic illustration of the effect of lattice distortion and temperature on the intensity of the XRD peaks [36]

The sluggish diffusion effect. In HEA, the potential energy between the nodes of the crystal lattice changes because of the heterogeneity of the atoms. In ordinary alloys with a low concentration of dissolved matter, the local configuration of the atoms before and after the vacancy jump is the same in most cases, while in HEA the difference in local atomic configurations leads to different bonds and, consequently, different local energies. In [40] the calculation of the activation energy of diffusion of elements in different matrices of CoCrFeMnNi HEA is presented. It is known that the fluctuations of the potential energy of interatomic bonding affect the kinetics and activation energy of diffusion. In pure metals, the fluctuation of potential energy after the migration of atoms is zero. With substantial changes in potential energy, at which the potential barrier and activation energy of diffusion increase, trapping of atoms by "traps" is likely and, consequently, the diffusion coefficient is lower. Properties of HEA, such as slow grain growth [41], strength at hot temperature [28, 42], and formation of

nanostructures and nanoscale separations [30, 43-45], are associated with low values of the diffusion coefficient of atoms in HEA.

*The cocktail effect.* Compared to the other "core effects", the "cocktail" (mixing) effect is not a hypothesis and does not require proof. The essence of the "cocktail effect" is that exceptional properties of materials are often the result of unexpected interactions that can occur due to unusual combinations of elements and microstructures in multi-element systems.



Figure 3. Hardness of Al<sub>x</sub>CoCrCuFeNi alloys as a function of Al concentration [29]

It should be noted that the properties of multicomponent alloys are due not only to the constituent elements, but also to the formation of phases. Depending on the composition, method of production and processing of the alloy, ordered and disordered phases of the solid solution are formed in the HEA. Both the atoms of the individual elements and the phases formed contribute to the properties of the HEA, which is the "cocktail" effect. In addition to the properties of the individual elements, the interaction between the constituent elements should also be considered. For example, Al is a soft element with a low melting point, but the addition of Al can improve the strength of the HEA. Fig. 3 shows the hardness of Al<sub>x</sub>CoCrCuFeNi alloys as a function of Al concentration. The increase in the strength of Al<sub>x</sub>CoCrCuFeNi alloys is due to the formation of the solid phase of the BCC and stronger cohesive bonding between Al and other elements.

The macroscopic properties of HEA are determined not only by the averaged properties of its constituent elements, but also include the effects of excess quantities resulting from inter-element reactions and distortion of the crystal lattice.

#### 2.2 Thermodynamics of HEA

According to the second law of thermodynamics, the course of phase transformation processes is determined by the action of enthalpies (energy) and entropies (structural). Enthalpy determines the tendency of the system to go to the state with the lowest energy. Entropy determines the tendency of the system to go to the state with the maximum degree of disorder. As noted earlier, high entropy is the main factor influencing the formation of single-phase solid solutions, as was shown in [46].

For pure elements, the entropy depends only on the vibrational (thermal) motion of the atoms. And in the cases of alloys, in addition to vibrational  $S_v$ , the entropy of mixing is composed of the configurational  $S_{conf}$ , magnetic  $S_m$ , and electronic  $S_e$  components [20]. The mixing entropy also has the property of additivity. Consequently,  $S_{mix}$  can be mathematically expressed as:

$$\Delta S_{mix} = \Delta S_{conf} + \Delta S_v + \Delta S_m + \Delta S_e. \tag{1}$$

Also, in [46, 47] it is noted that for the case of multicomponent HEA, consisting of five or more elements, the configuration entropy dominates over the other three components. Since it depends on the many ways of distribution of atoms in the lattice and the resulting vacancies. An increase in the number of components leads to an increase in the configurational entropy, which leads to a decrease in the Gibbs free energy (2).

$$\Delta G = \Delta H - T \Delta S. \tag{2}$$

where G – Gibbs energy; H – enthalpy; S – entropy; T – absolute temperature.

In [31] it was shown that the multicomponent AlCrFeNiCu system with high mixing entropy has lower Gibbs energy ( $\Delta G$ ) values than intermetallics. It was believed that with increasing mixing entropy the possibility of formation of stable disordered solid solutions is higher than for ordered or intermetallic compounds.

It is possible to prove this statement based on Boltzmann hypothesis [48], therefore, in the case of equal molar fractions of each element the entropy of mixing is expressed as (3):

$$\Delta S_{mix} = -R (1/n \ln 1/n + 1/n \ln 1/n + ... + 1/n \ln 1/n) =$$
  
= -R \ln1/n = R \lnn (3)

Thus, the mixing entropy of solid solution formation increases as the number of elements increases (Figure 4).



Figure 4. Entropy of mixing of alloys with the equiatomic ratio depending on the number of components [49]

There are different HEA structures: based on solid solution [7, 50, 51]; mixtures of intermetallic phases [52, 53]; amorphous phase [54, 55]; alloys with a more

complex multiphase structure [30, 56–58]. This indicates that, in addition to high entropy, there are other factors affecting the formation of HEA. In [46, 59, 60], the authors identified three main parameters responsible for the formation of amorphous phases and solid solutions in multicomponent alloys. These parameters included the atomic size difference ( $\delta$ ), enthalpy ( $\Delta H_{mix}$ ), and entropy ( $\Delta S_{mix}$ ) of mixing. The obtained calculated formulas of the parameters are presented below:

- entropy of mixing [61]:

$$\Delta S_{mix} = -R \sum c_i lnc_i \tag{4}$$

R – the universal gas constant,  $c_i$  – the concentration (at. %) of the *i*-th element in the alloy;

- enthalpy of mixing [62]:

$$\Delta H_{mix} = \sum 4\Omega_{ij} c_i c_j \tag{5}$$

 $c_i$  and  $c_j$  – the concentration (at. %) of the *i*-th and *j*-th element in the alloy, respectively,  $\Omega_{ij} = 4\Delta H_{AB}^{mix}$  – concentration-dependent parameter characterizing the interaction between elements in solid solution;

- average difference in atomic radii:

$$\delta r = 100\% \sqrt{\sum c_i \left(1 - r_i / \overline{r}\right)^2} \tag{6}$$

 $c_i$  – the concentration (at. %) of the *i*-th element in the alloy,  $r_i$  – atomic radius of the *i*-th element in the alloy,  $\overline{r} = \sum c_i r_i$  – average atomic radius of the alloy.

The authors state [60–63] those solid solutions formed when the difference of atomic sizes is not great, the enthalpy of mixing has values close to zero, and the entropy of mixing has high values. In contrast, the amorphous phase tends to form when the difference in atomic size is significant, the enthalpy of mixing is negative, and the entropy of mixing is low. However, further studies have shown that the use of these parameters to predict the phase composition of the HEA does not always yield clear and accurate results. Based on these three parameters, it is impossible to say for sure whether a solid solution or an amorphous phase will form.

In order to predict the structure of HEA, the above factors have been considered in a number of works [60, 61, 64, 65]. For example, in [60] it was shown that the solid solutions in HEA (alloys CrFeCoNiAlCu<sub>0.25</sub>, VCuFeCoNi, Al<sub>0.5</sub>CrFeCoNi, Ti<sub>2</sub>CrCuFeCoNi, ZrTiVCu NiBe and AlTiVYZr) are formed at values -15 kJ/mol  $\leq \Delta H_{mix} \leq 5$  kJ/mol and  $1 \leq \delta r \leq 6\%$ . The required mismatch parameter between the atomic radii of the elements for solid solution formation agrees well with the Hume-Rothery rule.

Then in [63] it was proposed to introduce an additional thermodynamic parameter  $\Omega$ , to predict the formation of the HEA structure

$$\Omega = T_m \Delta S_{mix} \left| \Delta H_{mix} \right| \tag{7}$$

 $T_m = \sum c_i T_{mi}$  and  $T_{mi}$  – is the melting temperature of the elements. Calculations of  $\Omega$  together with  $\delta r$  showed that

the formation of simple solid solutions in HEA is observed, to a greater extent, when the condition  $\Omega \ge 1.1$  and  $\delta r \le 6.6\%$  is fulfilled, and the formation of multiphase structure consisting of solid solutions and intermetallic phases is fulfilled when the condition  $1.1 < \Omega < 10$  and  $\delta r > 3.8\%$ . Despite the error, the parameter  $\Omega$  can function as a sufficiently reliable "tool" to distinguish between the formation of solid solutions or intermetallic phases in multicomponent systems. The high value of the parameter  $\Omega > 1.1$  and the small value of  $\delta r < 6.6\%$  predict the formation of solid solutions in HEA.

The application of Hume-Rothery rules to predict the phase composition of HEA shows some difficulties, since it is difficult to select a large number of elements having the same lattice type and valence values. For example, based only on Hume-Rothery rules in the Co(FCC)-Cr(BCC)-Fe(BCC)-Ni(FCC)-Mn(FCC) alloy, consisting of elements with completely different crystal lattices, the structure of a simple solid solution is formed, a multiphase structure should be formed [66–70]. A similar system Al(FCC)-Co(FCC)-Cr(BCC)-Cu(FCC)-Fe(BCC)-Ni(FCC) formed a multiphase structure [57].

In [71], it was proposed to complement the Hume-Rothery rules for multicomponent alloys. The following factors determining the formation of phases were considered:

- size factor associated with the difference in atomic radii ( $\delta r$ ) of the constituent components;

– electrochemical factor associated with the difference in electronegativity ( $\Delta \chi$ ) of the components;

electron concentration per atom, e/a;

 the ability to complete the electron shells of element atoms near the end of short periods;

– orbital limitations.

Another approach was proposed by the authors Miracle and Senkov [50, 72] in the study of a singlephase alloy of the TaNbHfZrTi system with the BCC lattice, which they had previously applied to predict structure formation in amorphous alloys [54]. The peculiarity of the approach is that dissolved substances can destabilize the matrix lattice due to internal stresses and change the coordination number. The approach is based on the calculation of local changes in the interatomic distance and the elastic modulus arising near atoms of a certain sort in the assumed equiatomic solid solution. In a BCC lattice, they can be estimated as follows. Each element in this lattice has 8 nearest atoms, thus forming a cluster of 9 atoms. It is possible to roughly estimate the local environment of the atom of element iif we assume that the local chemical composition corresponds to the composition of the alloy. Thus, element *i* has  $N_j = 9c_j$  neighboring atoms of element j and  $N_i = 9c_i$ neighboring atoms of element j. Then the change of interatomic distances  $\delta r_i$ , and elastic modulus  $\delta G_i$ , around element i is estimated as an average difference of atomic radius and elastic modulus of this element with its neighbors:

$$\delta r_i = \frac{9}{8} \sum c_i \delta r_{ij} \tag{8}$$

$$\delta G_i = \frac{9}{8} \sum c_i \delta G_{ij} \tag{9}$$

 $\delta r_{ij} = 2(r_i - r_j)/(r_i + r_j)$  is the difference in atomic radii,  $\delta G_{ij} = 2(G_i - G_j)/(G_i + G_j)$  – the difference in the elastic modulus of the elements *i* and *j*.

From the values of the modulus of elasticity, we can determine the element that causes the greatest local lattice distortion. It is assumed that local lattice distortions caused by the addition of elements can lead to lattice instability of the solid solution, hence the formation of other phases. This approach allows us to answer the question of whether the structure of disordered solid solution will form or not, but the question of which phases will form in the structure remains open.

Another parameter, the electronegativity difference, in multicomponent alloys [61] defined as:

$$\Delta \chi = \sqrt{\sum_{i=1}^{N} c_i \left(\chi_i - \overline{\chi}\right)^2}$$
(10)

 $\chi_i$  – Pauling electronegativity for the *i*-th component,  $\overline{\chi} = \sum_{i=1}^{N} c_i \chi_i$  – average electronegativity.

In [73] an attempt was made to predict the formation of phases by applying the parameters  $\delta r$  and  $\Delta \chi$ . Instead of the empirical Pauling scale, the determination of electronegativity by the method described in [64] was used:

$$\Delta \chi_{Allen} = \sum_{i=1}^{N} c_i \left( 1 - \chi_i / \overline{\chi} \right). \tag{11}$$

The electronegativity in this case is represented as the average ionization energy of the valence electrons of free atoms in the ground state, and its values often coincide with the Pauling electronegativity, however, they differ greatly for transition metals. It has been shown that at  $3 < \Delta \chi_{Allen} < 6$  and  $1 < \delta r < 6\%$  the formation of only solid solutions and not intermetallic phases (including the  $\sigma$ phase) is observed. In particular, there is a tendency that solid solutions with a BCC lattice can exist with a larger parameter of atomic radius mismatch of elements and a smaller difference in electronegativity than solid solutions with a FCC lattice. At higher values of  $\Delta \gamma_{Allen}$ such an area is observed in which intermetallics prevail. At  $\delta r \approx 6\%$  and a high electronegativity difference, a boundary state between the formation of solid solutions and intermetallic phases is observed. These data show that such parameters as  $\delta r$  and  $\Delta \chi_{Allen}$  cannot be used for unambiguous prediction of the phase composition of HEA.

The Hume-Rothery rules define the electronic concentration per atom (e/a ratio), which has an obvious influence on the crystal structure of the so-called Hume-Rothery electronic compounds. In [65] it is described that there are two basic definitions of electronic concentration: the average number of free electrons per atom e/a,

and the total number of electrons, including d-level electrons located in the valence band, the number of valence electrons (*VEC*). The e/a or *VEC* for a multi-component alloys can be determined as:

$$VEC = \sum_{i=1}^{n} c_i \left( VEC \right)_i \tag{12}$$

However, HEA consist mainly of transition metals (alloys of the CoCrFeNiAlCu system), for which the e/a ratio is ambiguous, and in most cases impossible. For this reason, the authors [65] proposed to study the influence of *VEC* on the phase composition of HEA. It was shown that the *VEC* can be used to quantitatively predict the phase stability of the FCC and BCC phases in the HEA. Thus, at *VEC*  $\geq$  8.0 – a single-phase FCC structure is formed; at 6.87  $\leq$  *VEC* < 8.0 – BCC and FCC phases coexist together; at *VEC* < 6.87 – a single-phase BCC structure is observed. It should be noted that at *VEC* = 8 the BCC phases can be formed, however, they are secondary.

Based on the analysis of the literature data, we can say that at present there is no universal parameter that could allow to correctly predict the formation of structures in multicomponent alloys systems. Thus, the definition of the conditions governing the stability of phases in HEA, through statistical analysis of the general behavior of the constituent elements in multicomponent alloys, is an actual task.

# 3.1 Methods for the preparation of HEA powders

Pre-alloyed HEA is the production of a fine metal powder, where the alloy consists of five or more basic metal powders. From various research articles it appears that experimenters and researchers use pre-alloyed HEA powders as well as HEA powders obtained by traditional metal powder mixing followed by cold isostatic pressing or spark plasma sintering to give the desired shape [74-81]. There are also alternative ways of producing HEA powders. In fully pre-alloyed powders, two methods are mainly used, i.e., atomization (gas atomizing) or mechanical alloying (MA) (by using a ball milling machine), as well as other methods of producing HEA by melting and then grinding into powder using high-energy milling [24, 82]. In recent studies, the most pre-doped HEA powders are usually obtained by mechanical crushing and pulverizing and then consolidated by various consolidation methods. Scheme for the preparation of HEA powders and known consolidation methods shown in the Figure 5.

The HEA powders obtained by different methods have the same microstructure, a confirmation are the works where HEA WMoNbZrV obtained by arc melting [27, 28] and MA [83], obtained typical dendritic microstructure. MA is more optimal for high melting point alloys that are difficult to process by casting methods. MA is widely recognized as an important nonequilibrium solid-phase process route for the synthesis of various alloys with different phase composition and microstructure [84].

At present, there is a high level of research on HEAbased alloys and coatings due to their properties and unique application possibilities, especially the development of HEA-based coatings. Based on recent developments in this direction, HEA coatings can be divided into three groups [85, 86]: (1) metallic HEA, (2) ceramic HEA (or high-entropy ceramics), and (3) highentropy composites.

Metallic HEA coatings include Cantor-based alloys [7] and their derivatives with other lightweight HEA based on transition elements Al, Cr, Co, Mn, Fe, Ti, Ni, V, refractory Ta, Mo, Hf, Nb, Zr, W, Ti, V, Cr, etc. [28]. HEA metal coatings are aimed at high-temperature applications where oxidation, wear and corrosion are of paramount importance. At the same time, lightweight metal alloy coatings are being researched for density reduction for various lightweight structural applications such as AlCuSiZnFe, AlLiMgScTi, AlCuFeMnMgTi, AlLiMgTiX, etc. [87-90].

High-entropy ceramics mainly consist of metal nitrides and carbides of transition elements [85]. In HEA solid ceramic coatings, constituent impurities such as O, C, N, H are manifested in solid solution and exhibit a high entropy effect. For hard ceramic HEA coatings such as Cr, Si, Zr, various ceramic forming elements Ti, Al, etc. are used. These HEA coatings have exceptional surface protection ability in terms of high strength, thermal stability, anti-corrosion characteristics and low diffusion rate [91, 92]. Because of these characteristics, these coatings are used for thermodiffusion, oxidation-resistant and tough radiation-resistant coatings in nuclear power plants [93].

High-entropy composite coatings are being developed based on metallic and ceramic coatings [94– 96]. Similar to conventional composites, HEA composites can be synthesized by reinforcing the HEA matrix with suitable ceramic reinforcing elements. There are developments of ceramic reinforcing materials such as SiC, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, WC, TiC, TiN, TiB<sub>2</sub>, NbC [94–96] that show better hardness, wear resistance, chemical stability and adhesion to the matrix coatings of HEA.



Figure 5. Scheme for the preparation of HEA powders and known consolidation methods

Coatings have been obtained through the development and evolution of various methods of producing HEA coatings. Significant progress has been made in these HEA composite coatings made by laser cladding, plasma arc cladding, magnetron sputtering, etc.

### 3.2.1 Laser cladding method

Laser cladding (laser doping of the surface) is a rapidly developing surface treatment method with the exceptional advantage of a high solidification rate  $(10^{3} 10^{6} \text{ K} \cdot \text{s}^{-1}$ ). This method is a frequently used method for HEA coating. The authors note that a feature of the method is high heat input, fast process, less material loss and environmentally friendly process [97-99]. Laser cladding allows the capture of nonequilibrium dissolved substances and avoids the stratification of components. This method can be used to produce HEA coatings with a thickness of about 1–5 mm, which is much larger than that of films produced by magnetron sputtering. Laser cladding provides a metallurgical bond strength between the coating and the substrate, which is higher than that of the thermal spraying method. In [100], Al2CrFeNiCoCuTix coatings were obtained by laser cladding. The typical morphology of the microstructure of Al2CrFeNiCoCuTix coatings is presented in [100], which shows that the cladding layer of the coatings consists of a cladding zone, a boundary zone, a thermal influence zone, and a substrate zone. The cladding zone mainly consists of equiaxed crystals away from the substrate and columnar crystals near the substrate. The coverslips consisted of FCC, BCC, and Laves phases because of the high entropy effect.

This process favors the strong adhesion of the coating to the substrate, homogeneous microstructure, and formation, but has less thermal damage caused by the fast heating and cooling rates involved in the process. The main disadvantages of laser doping of the surface are the formation of the peri-seam zone, high residual stresses and elemental dilution of the HEA coating and the substrate [101].

There is also a problem arising during laser processing, in the process of obtaining a coating on a substrate with a low melting point. The problem is that there is often a significant dilution of elements from the substrate. In [102], AlCoCrCuFeNi coatings on pure magnesium substrates were obtained by laser cladding. It was found that the Mg element in the matrix melts into the lower layer of HEA coatings. [103–104] synthesized AlFeCoCrNi coatings by laser surfacing on an aluminum substrate and found that laser treatment results in a composite microstructure of a HEA-rich BCC phase embedded in an aluminum-enriched matrix.

#### 3.2.2 Magnetron sputtering method

Magnetron sputtering (MS) is also a frequently used method for producing HEA films and coatings. In MS, the main parameters affecting the properties of the coatings are the target composition, the bias voltage, and the gas flow rate. HEA coatings obtained by MS have excellent properties, such as high hardness and Young's modulus, wear resistance, thermal stability at elevated temperatures, and diffusion retardation [105, 106]. The properties of HEA coatings can be further improved by nitrogen doping, as the structure of HEA coatings transforms from amorphous to FCC [107–111]. In [112] it is noted that this method is considered one of the most effective methods of deposition of thin films based on HEA. In [113] the results of the study of FeCrNiTiZrAl coating obtained by MS, the coating characteristics are not inferior to high-entropy equiatomic alloys.

Most magnetron sputtered HEA coatings are nitride, carbide and boride HEA coatings with excellent wear, oxidation and irradiation resistance properties [114–118]. Most of these sputtered coatings have BCC or FCC solid solution phases with an amorphous structure compared to other coatings deposited by thermal spraying.

The main disadvantage of this method of coating production is the problem of working with strongly magnetic substances (Ni, Co, Fe). In MS it is impossible to achieve high-speed sputtering at low temperature for strongly magnetic materials, because almost all the magnetic flux cannot pass through the magnetic target, so it is impossible to add an external amplifying magnetic field near the surface of the target.

### 3.2.3 Electrochemical deposition

Electrochemical deposition makes it possible to deposit HEA films on substrates with complex geometry, conduct it at low processing temperatures and low energy consumption. Since electrochemical deposition does not require sophisticated equipment and expensive raw materials, it enables inexpensive synthesis of HEA films. In addition, by varying the deposition parameters, electrodeposition can easily control the composition, morphology, and thickness of the films [119–121].

In [120], the use of the pulsed electrochemical deposition method successfully led to the synthesis of thin films of the highly entropic CoCrFeMnNi alloy. It was noted that the morphology of the film surface and the composition of the HEA depended on various parameters of the applied pulse, such as the filling factor and frequency. The structure and surface morphology of electrodeposited CoCrFeMnNi coatings are described for the first time in the present work. The unified solid solution structure of the FCC type was identified by Xray diffraction analysis. It can be concluded that the application of the strategy of HEA production by electrodeposition can provide a promising approach to the development of new metallic materials with remarkable properties. The main drawback of this method is the need to use toxic, environmentally unsafe electrolytes.

## 3.2.4 Thermal spraying

Recently, according to published articles in obtaining HEA gas-based coatings by thermal spraying, most researchers use plasma arc cladding, plasma spraying, high velocity oxy-fuel spraying (HVOF), and cold spraying methods. It is noted that not only the chemical composition of materials in HVOF-based thermal spraying is the main factor influencing the characteristics of the coating, but also the parameters of thermal spraying will play a significant role.

The plasma arc cladding process has many advantages for the synthesis of HEA films and coatings, such as high energy exchange efficiency, low thermal deformation of the part, low dilution of the substrate material, and good metallurgical bonding to the substrate [96, 127]. Typically, the HEA arc melting method is mainly fabricated or coated to avoid segregation during solidification [21].

Plasma spraying is widely used in the aerospace, automotive, petrochemical and mining industries for coatings and repair of parts [122–124]. The heat source of plasma spraying is a DC plasma arc, which is high enough to atomize and apply all types of coatings, including ceramics with high Tm. The plasma deposition method, a high-energy coating deposition procedure, is also widely used in HEA-based coating applications [125]. Compared to laser surface doping, plasma cladding has a higher blowing force, through which the molten coating materials are melted and mixed to achieve microstructure and characterization homogenization [125].

In contrast to plasma spraying, the heat source in HVOF is the heat of combustion of fuel and oxygen. Meanwhile, the HVOF sputtering process is characterized by a high particle jet velocity and a relatively low processing temperature [128]. So far, studies concerning HVOF-based coating materials have mainly involved the characterization of microstructural evolution, phase composition, and wear and oxidation behavior [129, 130].

In contrast to the traditional fusion-based coating manufacturing method, cold spraying (CS) is a newly developed solid-state coating method, so there is no oxidation, phase transformation or residual thermal stress. To date, HEA-related coatings deposited by the CS method are limited to HEA materials with low strength and high ductility because of the internal mechanism [131] of the CS method, such as FeCoNiCrMn type FCC [132].

Although these coating methods have demonstrated great potential related to HEA, much work is still needed from theory and applications to further expand the applicability in HEA systems, such as adapting processing parameters and using post-processing [133–134] after coating fabrication. Also, in recent works related to HEA-based coatings, a detonation spraying method has been started [135–137], this method is also related to the gas-thermal method.

New developments in terms of innovations, both in terms of starting materials for HEA-based coatings and in terms of the appropriate regulation of thermal spray processes, need to be investigated and developed to further expand the application in the production of HEAbased coatings with special microstructural characteristics and outstanding properties.

### 4 CONCLUSIONS

In this article the concept of HEA was considered, based on the analysis of the literature data we can make the main conclusions:

- Currently, there is no universal parameter that could predict the formation of structures in multicomponent systems of alloys. Determining the conditions governing the stability of phases in HEA by statistical analysis of the overall behavior of the constituent elements in multicomponent alloys is an urgent task.

- Materials related to HEA, both as bulk materials and as coatings, have a wide range of applications due to their outstanding physical, chemical and mechanical properties. A further trend of development will be the study of non-equimolar HEA and non-Cantor alloys. But the goal remains the same to use entropy and develop a certain combination to achieve the desired mechanical and functional properties. Just the same research on the nature of physical and chemical processes occurring during mechanochemical synthesis of powders and the development of ideas about the formation of the structure and properties of HEA under conditions of cryogenic mechanochemical alloying is a relevant area for research.

- The use of HEA in general seems promising and requires additional research both in the direction of finding strategies for creating practically significant compositions, and in the direction of increasing the properties of alloys for their further operation at elevated temperatures in aggressive environments.

At the moment, work is being done on the development and application of stable HEA structures. As described in many literatures HEA will be used to a greater extent in structural materials for operation at low and high temperatures. Since the diffusion processes at low temperatures are very slow, and the HEA will be in a metastable state for a long period of time, the same properties have structural alloys.

To design and develop HEA that have better mechanical properties under different environmental conditions stability in phases or strengthening mechanisms is an important aspect. From the reviews of research papers, it is only by using MA that solid solution phases with multiple phases and complex structures are formed. The transformation of phases into complex structures and multiple solid solution phases observed during consolidation and annealing indicate metastable phases formed during MA. This means that the research in this direction should be developed.

#### REFERENCES

- Quiambao K. Passivation of a corrosion resistant high entropy alloy in non-oxidizing sulfate solutions / K. Quiambao, S. McDonnell, D. Schreiber, A. Gerard, K. Freedy, P. Lu, J. Saal, G. Frankel, J. Scully // Acta Materialia. – 2019. – Vol. 164. – P. 362–376. https://doi.org/10.1016/j.actamat.2018.10.026
- 2. Qiu Y. Microstructural evolution, electrochemical and corrosion properties of AlxCoCrFeNiTiy high entropy

alloys / Y. Qiu, S. Thomas, D. Fabijanic, A. Barlow, H. Fraser, N. Birbilis // Materials & Design. – 2019. – Vol. 170. – A. 107698.

https://doi.org/10.1016/j.matdes.2019.107698

- Joseph J. The sliding wear behaviour of CoCrFeMnNi and AlxCoCrFeNi high entropy alloys at elevated temperatures / J. Joseph, N. Haghdadi, K. Shamlaye, P. Hodgson, M. Barnett, D. Fabijanic // Wear. – 2019. – Vol. 428–429. – P. 32–44. https://doi.org/10.1016/j.wear.2019.03.002
- Yang T. Control of nanoscale precipitation and elimination of intermediate temperature embrittlement in multicomponent high-entropy alloys / T. Yang, Y. Zhao, L. Fan, J. Wei, J. Luan, W. Liu, C. Wang, Z. Jiao, J. Kai, C. Liu // Acta Materialia. – 2020. – Vol. 189. – P. 47–59. https://doi.org/10.1016/j.actamat.2020.02.059
- MacDonald B. Influence of phase decomposition on mechanical behavior of an equiatomic CoCuFeMnNi high entropy alloy / B. MacDonald, Z. Fu, X. Wang, Z. Li, W. Chen, Y. Zhou, D. Raabe, J. Schoenung, H. Hahn, E. Lavernia // Acta Materialia. – 2019. – Vol. 181. – P. 25– 35. https://doi.org/10.1016/j.actamat.2019.09.030
- Wu Y. High strength NiMnFeCrAlCu multi-principalelement alloys with marine application perspective / Y. Wu, Y. Li, X. Liu, Q. Wang, X. Chen, X. Hui // Scripta Materialia. – 2021. – Vol. 202. – A. 113992. https://doi.org/10.1016/j.scriptamat.2021.113992
- Cantor B. Microstructural development in equiatomic multicomponent alloys / B. Cantor, P. Chang, P. Knight, A. Vincent // Materials Science and Engineering: A. – 2004. – Vol. 375–377. – P. 213–218. https://doi.org/10.1016/j.msea.2003.10.257
- Zhao Y. Heterogeneous precipitation behavior and stacking-faultmediated deformation in a CoCrNi-based medium-entropy alloy / Y. Zhao, T. Yang, Y. Tong, J. Wang, J. Luan, Z. Jiao, D. Chen, Y. Yang, A. Hu, C. Liu, J. Kai // Acta Materialia. – 2017. – Vol. 138. – P. 72–82. https://doi.org/10.1016/j.actamat.2017.07.029
- Chang H. Novel Si-added CrCoNi medium entropy alloys achieving the breakthrough of strength-ductility trade-off / H. Chang, T. Zhang, S. Ma, D. Zhao, R. Xiong, T. Wang, Z. Li, Z. Wang // Materials & Design. – 2021. – Vol. 197. – A. 109202.

https://doi.org/10.1016/j.matdes.2020.109202

- Shuang S. Corrosion resistant nanostructured eutectic high entropy alloy / S. Shuang, Z. Ding, D. Chung, S. Shi, Y. Yang // Corrosion Science. - 2019. – Vol. 164. – A. 108315. https://doi.org/10.1016/j.corsci.2019.108315
- 11. Zhao Y. Thermal stability and coarsening of coherent particles in a precipitation-hardened (NiCoFeCr)94Ti2Al4 highentropy alloy / Y. Zhao, H. Chen, Z. Lu, T. Nieh // Acta Materialia. – 2018. – Vol. 147. – P. 184–194. https://doi.org/10.1016/j.actamat.2018.01.049
- Senkov O. High temperature strength of refractory complex concentrated alloys / O. Senkov, S. Gorsse, D. Miracle // Acta Materialia. – 2019. – Vol. 175. – P. 394– 405. https://doi.org/10.1016/j.actamat.2019.06.032
- Zhang M. Synthesis and characterization of refractory TiZrNbWMo high-entropy alloy coating by laser cladding / M. Zhang, X. Zhou, X. Yu, J. Li // Surface and Coatings Technology. – 2017. – Vol. 311. – P. 321–329. https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2017.01.012
- Yeh J-W. Recent progress in high-entropy alloys / J-W Yeh // Annales de Chimie - Science des Matériaux. –

2006. – Vol. 31. – P. 633–648.

https://doi.org/10.3166/acsm.31.633-648

- Todai M. Novel TiNbTaZrMo high-entropy alloys for metallic biomaterials / M. Todai, T. Nagase, T. Hori, A. Matsugaki, A. Sekita, T. Nakano // Scripta Materialia. – 2017. – Vol. 129. – P. 65–68. https://doi.org/10.1016/j.scriptamat.2016.10.028
- 16. Gludovatz B. A fracture-resistant high-entropy alloy for cryogenic applications / B. Gludovatz, A. Hohenwarter, D. Catoor, E. Chang, E. George, R. Ritchie // Science. 2014. Vol. 345. P. 1153–1158. https://doi.org/10.1126/science.1254581
- Xu X. Microstructural origins for a strong and ductile Al0.1CoCrFeNi high-entropy alloy with ultrafine grains / X. Xu, P. Liu, A. Hirata, S. Song, T. Nieh, M. Chen // Materialia. – 2008. – Vol. 4. – P. 395-405. https://doi.org/10.1016/j.mtla.2018.10.015
- Xu X. Temperature-dependent compression behavior of an Al0.5CoCrCuFeNi high-entropy alloy / X. Xu, S. Chen, Y. Ren, A. Hirata, T. Fujita, P. Liaw, M. Chen // Materialia. – 2019. – Vol. 5. – A. 100243. https://doi.org/10.1016/j.mtla.2019.100243
- Ni C. Characterization of Al0.5FeCu0.7NiCoCr highentropy alloy coating on aluminum alloy by laser cladding / C. Ni, Y. Shi, J. Liu, G. Huang // Optics & Laser Technology. – 2018. – Vol. 105. – P. 257-263. https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2018.01.058
- Gottshtain G. Fiziko-himicheskie osnovy materialovedeniya / G. Gottshtain – Moscow: Binom, Laboratoriya znanii, 2009, – 400 p.
- 21. Miracle B. A critical review of high entropy alloys and related concepts / D. Miracle, O. Senkov // Acta Materialia. – 2017. – Vol. 122. – P. 448-511. https://doi.org/10.1016/j.actamat.2016.08.081
- 22. Vaidya M. Influence of sequence of elemental addition on phase evolution in nanocrystalline AlCoCrFeNi: Novel approach to alloy synthesis using mechanical alloying / M. Vaidya, A. Prasad, A. Parakh, B. Murty // Materials & Design. – 2017. – Vol. 126. – P. 37–46. https://doi.org/10.1016/j.matdes.2017.04.027
- Miracle D. Exploration and development of high entropy alloys for structural applications / D. Miracle, J. Miller, O. Senkov, C. Woodward, M. Uchic, J. Tiley // Entropy. – 2014. – Vol. 16(1). – P. 494–525. https://doi.org/10.3390/e16010494
- 24. Kumar A. Mechanically alloyed high entropy alloys: existing challenges and opportunities / A. Kumar, A. Singh, A.Suhane // Journal of materials research and technology. – 2022. – Vol. 17. – P. 2431–2456. https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2022.01.141
- 25. Tsai M-H. Physical properties of high entropy / M-H Tsai // Entropy. - 2013. – Vol. 15(12). – P. 5338–5345. https://doi.org/10.3390/e15125338.
- 26. Yeh J-W. Alloy Design Strategies and Future Trends in High-Entropy Alloys / Yeh J-W // The journal of the Minerals, Metals & Materials Society. – 2013. – Vol. 65. – P. 1759–1771. https://doi.org/10.1007/s11837-013-0761-6
- Senkov O. Refractory high-entropy alloys / O. Senkov, G. Wilks, D. Miracle, C. Chuang, P. Liaw // Intermetallics. – 2010. – Vol. 18. – P. 1758–1765. https://doi.org/10.1016/j.intermet.2010.05.014
- Senkov O. Mechanical properties of Nb25Mo25Ta25W25 and V20Nb20Mo20Ta20W20 refractory high entropy alloys / O. Senkov, G. Wilks, J. Scott, D. Miracle //

Intermetallics. – 2011. – Vol. 19(5). – P. 698–706. https://doi.org/10.1016/j.intermet.2011.01.004

- 29. Tong C-J. Mechanical performance of the AlxCoCrCuFeNi high-entropy alloy system with multiprincipal elements / C-J. Tong, M-R.Chen, J-W. Yeh, S-J. Lin, P-H. Lee, T-T. Shun, S-Y. Chang // Metallurgical and Materials Transactions. – 2005. – Vol. 36. – P. 1263– 1271. https://doi.org/10.1007/s11661-005-0218-9
- 30. Tong C-J. Microstructure characterization of Al x CoCrCuFeNi high-entropy alloy system with multiprincipal elements / C-J. Tong, Y-L. Chen, J-W. Yeh, S-K.Chen, J-W. Yeh, T-T. Shun, C-H.Tsau, S-J.Lin, S-Y.Chang // Metallurgical and Materials Transactions. – 2005. – Vol. 36. – P. 881–893. https://doi.org/10.1007/s11661-005-0283-0
- 31. Li A. Thermodynamic analysis of the simple microstructure of AlCrFeNiCu high-entropy alloy with multi-principal elements / A. Li, X. Zhang // Acta Metallurgica Sinica (English Letters). – 2009. – Vol. 22. – P. 219–224. https://doi.org/10.1016/S1006-7191(08)60092-7
- 32. del Grosso M. Determination of the transition to the high entropy regime for alloys of refractory elements / M. del Grosso, G. Bozzolo, H. Mosca // Journal of Alloys and Compounds. – 2012. – Vol. 534. – P. 25–31. https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2012.04.053
- 33. Ng C. Entropy-driven phase stability and slow diffusion kinetics in an Al0.5CoCrCuFeNi high entropy alloy / C. Ng, S. Guo, J. Luan, S. Shi, C. Liu // Intermetallics. – 2012. – Vol. 31. – P. 165–172. https://doi.org/10.1016/j.intermet.2012.07.001
- 34. Lucas M. Absence of long-range chemical ordering in equimolar FeCoCrNi / M. Lucas, G. Wilks, L. Mauger, J. Munoz, O. Senkov, E. Michel, J. Horwath, S. Semiatin, M. Stone, D. Abernathy, E. Karapetrova // Applied Physics Letters. – 2012. – Vol. 100. – A. 251907. https://doi.org/10.1063/1.4730327
- Tsai M. High-Entropy Alloys: A Critical Review / M. Tsai, J. Yeh // Materials Research Letters. – 2014. – Vol. 2(3). – P. 107–123.
- https://doi.org/10.1080/21663831.2014.912690
  36. Yeh J-W. Anomalous decrease in X-ray diffraction intensities of Cu-Ni-Al-Co-Cr-Fe-Si alloy systems with multiprincipal elements / J-W. Yeh, S-Y. Chang, Y-D. Hong, S-K. Chen, S-J. Lin // Materials Chemistry and Physics. 2007. Vol. 103. P. 41–46.
- https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2007.01.003
  37. Cullity B. Elements of X-Ray Diffraction. / B.D. Cullity, S.R. Stock. New York: Pearson, 2001. 696 p.
- Pearson W. A Handbook of Lattice Spacing and Structures of Metals and Alloys / W.B. Pearson. – New York: Pergamon Press, 1967. – 1446 p.
- Lonsdale K. International Tables for X-Ray Crystallography / K. Lonsdale, N. Henry. – Birmingham: Kynoch Press, 1968. – 362 p.
- 40. Tsai K-Y. Sluggish diffusion in Co–Cr–Fe–Mn–Ni highentropy alloys / K-Y. Tsai, M-H. Tsai, J-W. Yeh // Acta Materialia. – 2013. – Vol. 61. – P. 4887–4897. https://doi.org/10.1016/j.actamat.2013.04.058
- Liu W. Grain growth and the Hall–Petch relationship in a high-entropy FeCrNiCoMn alloy / W. Liu, Y. Wu, J. He, T. Nieh, Z. Lu // Scripta Materialia. – 2013. – Vol. 68. – P. 526–529. https://doi.org/10.1016/j.scriptamat.2012.12.002
- 42. Hsu C. On the superior hot hardness and softening resistance of AlCoCrxFeMo0.5Ni high-entropy alloys / C.

Hsu, C. Juan, W. Wang, T. Sheu, J. Yeh, S. Chen // Materials Science and Engineering: A. – 2011. – Vol. 528. – P. 3581–3588.

https://doi.org/10.1016/j.msea.2011.01.072

- 43. Yeh J-W. Nanostructured High-Entropy Alloys with Multiple Principal Elements: Novel Alloy Design Concepts and Outcomes / J-W. Yeh, S-K. Chen, S-J. Lin, J-Y. Gan, T-S. Chin, T-T. Shun, C-H. Tsai, S-Y. Chang // Advanced Engineering Materials. – 2004. – Vol. 6. – P. 299–303. https://doi.org/10.1002/adem.200300567
- 44. Shun T-T. Formation of ordered/disordered nanoparticles in FCC high entropy alloys / T-T.Shun, C-H.Hung, C-F.Lee // Journal of Alloys and Compounds. – 2010. – Vol. 493. – P. 105–109. https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2009.12.071
- 45. Tsai M-H. Morphology, structure and composition of precipitates in Al0.3CoCrCu0.5FeNi high-entropy alloy / M-H.Tsai, H. Yuan, G. Cheng, W. Xu, K-Y. Tsai, C-W. Tsai, W. Jian, C-C. Juan, W-J. Shen, M-H. Chuang, J-W. Yeh, Y. Zhu // Intermetallics. – 2013. – Vol. 32. – P. 329– 336. https://doi.org/10.1016/j.intermet.2012.07.036
- 46. Pogrebnyak A. The structure and properties of highentropy alloys and nitride coatings based on them / A. Pogrebnyaka, A. Bagdasaryana, I. Yakushchenkoa, V. Beresnevb // Russian Chemistry Reviews. – 2014. – Vol. 83. – P. 1027–1061. https://doi.org/10.1070/rcr4407
- 47. Oates W. Configurational Entropies of Mixing in Solid Alloys // Journal of Phase Equilibria and Diffusion / W. Oates // Journal of Phase Equilibria and Diffusion. – 2007. – Vol. 28. – P. 79–89. https://doi.org/10.1007/s11669-006-9008-3
- Swalin R. Thermodynamics of solids / R. Swalin, E. Burke, B. Chalmers, J. Krumhansl. – New York: John Wiley & Sons, 1991 – 388 p.
- 49. Zhang Y. Solid Solution Formation Criteria for High Entropy Alloys / Y. Zhang, Y. Zhou // Materials Science Forum. – 2007. – Vol. 561–565. – P. 1337–1339. https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.561-565.1337
- 50. Senkov O. Microstructure and room temperature mechanical properties of a high-entropy TaNbHfZrTi alloy / O. Senkov, J. Scott, S. Senkova, D. Miracle, C. Woodwart // Intermetallics. – 2011. – Vol. 509. – P. 6043–6048. https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2011.02.171
- 51. Gail A. Tensile Properties of high- and medium-entropy alloys / A. Gali, E. George // Intermetallics. – 2013. – Vol. 39. – P. 74–78. https://doi.org/10.1016/j.intermet.2013.03.018
- 52. Jiang L. Annealing effects on the microstructure and properties of bulk high-entropy CoCrFeNiTi0.5 alloy casting ingot / L. Jiang, Y. Lu, Y. Dong, T. Wang, Z. Cao, T. Li // Intermetallics. – 2004. – Vol. 44. – P. 37–43. https://doi.org/10.1016/j.intermet.2013.08.016
- 53. Shun T-T. Microstructure and mechanical properties of multiprincipal component CoCrFeNiMox alloys / T-T. Shun, L-Y. Chang, M-H. Shiu // Materials Characterization. – 2012. – Vol. 70. – P. 63–67. https://doi.org/10.1016/j.matchar.2012.05.005
- 54. Senkov O. A topological model for metallic glass formation / O. Senkov, D. Miracle // Journal of Non-Crystalline Solids. 2003. Vol. 317. P. 34–39. https://doi.org/10.1016/S0022-3093(02)01980-4
- Takeuchi A. Pd20Pt20Cu20Ni20P20 high-entropy alloy as a bulk metallic glass in the centimeter / A. Takeuchi, N.

Chen, T. Wada, Y. Yokoyama, H. Kato, A. Inoue, J. Yeh // Intermetallics. – 2011. – Vol. 19. – P. 1546–1554. https://doi.org/10.1016/j.intermet.2011.05.030

- 56. Marques F. Mg-containing multi-principal element alloys for hydrogen storage: A study of the MgTiNbCr0. 5Mn0. 5Ni0. 5 and Mg0. 68TiNbNi0.55 compositions / F. Marques, H. Pinto, S. Figueroa, F. Winkelmann, M. Felderhoff, W. Botta, G. Zepon // International Journal of Hydrogen Energy. – 2020. – Vol. 45. – P. 19539–19552. https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.05.069
- 57. Singh S. Decomposition in multi-component AlCoCrCuFeNi high-entropy alloy / S. Singh, N. Wanderka, B. Murty, U. Glatzel, J. Banhart // Acta Materialia. – 2011. – Vol. 59. – P. 182–190. https://doi.org/10.1016/j.actamat.2010.09.023
- Yeh J-W. Alloy design strategies and future trends in high-entropy alloys / J-W. Yeh // The Journal of The Minerals, Metals & Materials Society – 2013. – Vol. 65.– P. 1759–1771. https://doi.org/10.1007/s11837-013-0761-6
- 59. Zhang Y. Alloy Design and Properties Optimization of High-Entropy Alloys / Y. Zhang, X. Yang, P. Liaw // The Journal of The Minerals, Metals & Materials Society. – 2012. – Vol. 65. – P. 830–838. https://doi.org/10.1007/s11837-012-0366-5
- 60. Zhang Y. Solid-Solution Phase Formation Rules for Multicomponent Alloys // Advanced Engineering Materials / Y. Zhang, Y. Zhou, J. Lin, G. Chen, P. Liaw // Advanced Engineering Materials. – 2008. – Vol. 10(6). – P. 534– 538. https://doi.org/10.1002/adem.200700240
- 61. Fang S. Relationship between the widths of supercooled liquid region and bond parameters of Mg-based bulk metallic glasses / S. Fang, X. Xiao, L. Xia, W. Li, Y. Dong // Journal of Non-Crystalline Solids. – 2003. – Vol. 321. – P. 120–125. https://doi.org/10.1016/S0022-3093(03)00155-8
- Takeuchi A. Quantitative evaluation on critical cooling rate for metallic glasses / A. Takeuchi, A. Inoue // Materials Science and Engineering: A. – 2001. – Vol. 304–306. – P. 446–451. https://doi.org/10.1016/S0921-5093(00)01446-5
- Yang X. Prediction of high-entropy stabilized solid-solution in multi-component alloys. / X. Yang, Y. Zhang // Materials Chemistry and Physics. – 2012. – Vol. 132. – P. 233–238.
- https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2011.11.021 64. Mann J. Configuration Energies of the Main Group
- Elements / J. Mann, T. Meek, L. Allen // Journal of the American Chemical Society. – 2000. – Vol. 122. – P. 2780–2783. https://doi.org/10.1021/ja992866e
- 65. Guo S. Effect of valence electron concentration on stability of fcc or bcc phase in high entropy alloys / S. Guo, C. Ng, J. Lu, C. Liu // Journal of Applied Physics. – 2011. – Vol. 109. – A. 103505. https://doi.org/10.1063/1.3587228
- 66. Rahm M. Atomic and ionic radii of elements 1–96 / M. Rahm, R. Hoffmann, N. Ashcroft // Chemistry–A European Journal. – 2016. – Vol. 22. – P. 14625–14632. https://doi.org/10.1002/chem.201602949
- 67. Li K. Estimation of electronegativity values of elements in different valence states / K. Li, D. Xue // The Journal of Physical Chemistry A. – 2006. – Vol. 110. – P. 11332– 11337. https://doi.org/10.1063/1.1742493
- 68. Zhang Y. Electronegativities of elements in valence states and their applications. 1. Electronegativities of elements in

valence states / Y. Zhang // Inorganic Chemistry. – 1982. – Vol. 21. – P. 3886–3889. https://doi.org/10.1021/ic00141a005

- James A.M. Macmillan's Chemical and Physical Data / A.M. James, M.P. Lord. – Basingstoke: Macmillan Press, 1993. – 565 p.
- Samsonov G. V. Handbook of the Physicochemical Properties of the Elements / G. V. Samsonov. – New York: Springer, 1968. – 942 p.
- Mizutani U. Hume-Rothery rules for structurally complex alloy phases / U. Mizutani // Materials Research Society Bulletin. – 2012. – Vol. 37. – P. 169. https://doi.org/10.1557/mrs.2012.45
- 72. Miracle D. Topological criterion for metallic glass formation / D. Miracle, O. Senkov // Material Science and Engineering: A. – 2003. – Vol. 347. – P. 50–58. https://doi.org/10.1016/S0921-5093(02)00579-8
- Poletti M. Electronic and thermodynamic criteria for the occurrence of high entropy alloys in metallic systems / M. Poletti, L. Battezzati // Acta Materialia. – 2014. – Vol. 75. – P. 297–306. https://doi.org/10.1016/j.actamat.2014.04.033
- 74. Fan Y. AlNiCrFexMo0.2CoCu high entropy alloys prepared by powder metallurgy / Y. Fan, Y. Zhang, H. Guan, H. Suo, L. He // Rare Metal Materials and Engineering. 2013. Vol. 42. P. 1127–1129. https://doi.org/10.1016/S1875-5372(13)60074-0
- Veronesi P. Microwave Assisted preparation of high entropy alloys / P. Veronesi, R. Rosa, E. Colombini, C. Leonelli // Technologies. – 2015. – Vol. 3. – P. 182–197. https://doi.org/10.3390/technologies3040182
- 76. Qiu X-W. Structure and properties of AlCrFeNiCuTi six principal elements equimolar alloy / X-W. Qiu, C-X. Huang, M-J. Wu, C-G. Liu, Y-P. Zhang // Journal of Alloys and Compounds. – 2016. – Vol. 658. – P. 1–5. https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2015.10.224
- 77. Colombini E. High entropy alloys obtained by field assisted powder metallurgy route: SPS and microwave heating / E. Colombini, R. Rosa, L. Trombi, M. Zadra, A. Casagrande, P. Veronesi // // Materials Chemistry and Physics. 2018. Vol. 210. P. 78–86. https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2017.06.065
- 78. Zhang A. Rapid preparation of AlCoCrFeNi high entropy alloy by spark plasma sintering from elemental powder mixture / A. Zhang, J. Han, J. Meng, B. Su, P. Li // Materials Letters. – 2016. – Vol. 181. – P. 82–85. https://doi.org/10.1016/j.matlet.2016.06.014
- Veronesi P. Microwave processing of high entropy alloys: A powder metallurgy approach / P. Veronesi, E. Colombini, R. Rosa, C. Leonelli, M. Garuti // Chemical Engineering and Processing: Process Intensification. – 2017. – Vol. 122. – P. 397–403. https://doi.org/10.1016/j.cep.2017.02.016
- 80. Holmstrom E. High entropy alloys: substituting for cobalt in cutting edge technology / E. Holmstrom, R. Lizarraga, D. Linder, A. Salmasi, W. Wang, B. Kaplan, H. Mao, H. Larsson, V. Levente // Applied Materials Today. – 2018. – Vol. 12. – P. 322–329. https://doi.org/10.1016/j.apmt.2018.07.001
- 81. Waseem O. The effect of Ti on the sintering and mechanical properties of refractory highentropy alloy TixWTaVCr fabricated via spark plasma sintering for fusion plasma-facing materials / O. Waseem, J. Lee, H. Lee // Materials Chemistry and Physics. – 2018. – Vol.
210. – P. 87–94.

https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2017.06.054 82. Tian Y. Microstructures and oxidation behavior of Al-

- CrMnFeCoMoW composite coatings on Ti-6Al-4V alloy substrate via high-energy mechanical alloying method / Y. Tian, Y. Shen, C. Lu, X. Feng // Journal of Alloys and Compounds. – 2019. – Vol. 779. – P. 456–465. https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2018.11.266
- Oleszak D. High entropy multicomponent WMoNbZrV alloy processed by mechanical alloying / D. Oleszak, A. Antolak-Dudka, T. Kulik // Materials Letters. – 2018. – Vol. 232. – P. 160–162. https://doi.org/10.1016/j.matlet.2018.08.060
- 84. Suryanarayana C. Mechanical alloying and milling / C. Suryanarayana // Progress in Materials Science – 2001. – Vol. 46. – P. 1–184. https://doi.org/10.1016/S0079-6425(99)00010-9
- 85. Lee S. Deep learning-based phase prediction of highentropy alloys: Optimization, generation, and explanation / S. Lee, S. Byeon, H. Kim, H. Jin, S. Lee // Materials &Design. – 2021. – Vol. 197. – A. 109260. https://doi.org/10.1016/j.matdes.2020.109260
- Fu X. Materials selection considerations for high entropy alloys / X. Fu, C. Schuh, E. Olivetti // Scripta Materialia. – 2017. – Vol. 138. – P. 145–150. https://doi.org/10.1016/j.scriptamat.2017.03.014
- 87. Sharma A. Microstructural evolution and mechanical properties of non-Cantor AlCuSiZnFe lightweight high entropy alloy processed by advanced powder metallurgy / A. Sharma, M. Oh, B. Ahn // Materials Science and Engineering: A. 2020. Vol. 797. A. 140066. https://doi.org/10.1016/j.msea.2020.140066
- Youssef K. A novel low-density, high-hardness, high entropy alloy with close-packed single-phase nanocrystalline structures / K. Youssef, A. Zaddach, C. Niu, D. Irving, C. Koch // Materials Research Lettets. – 2014. – Vol. 3. – P. 95–99.
- https://doi.org/10.1080/21663831.2014.985855 89. Chae M. Lightweight AlCuFeMnMgTi High Entropy Alloy with High Strength-to-Density Ratio Processed by Powder Metallurgy / M. Chae, A. Sharma, M. Oh, B. Ahn // Metals and Materials International. – 2021. – Vol. 27. – P. 629–638. https://doi.org/10.1007/s12540-020-00823-5
- 90. Heydari H. Computational analysis of novel AlLiMgTiX light high entropy alloys / H. Heydari, M. Tajally, A. Habibolahzadeh // Materials Chemistry and Physics. – 2022. – Vol. 280. – A. 125834. https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2022.125834
- 91. Lin S-Y. Mechanical performance and nanoindenting deformation of (AlCrTa-TiZr)NCy multi-component coatings co-sputtered with bias / S-Y. Lin, S-Y. Chang, Y-C. Huang, F-S. Shieu, J-W. Yeh // Surface and Coating Technology. 2012. Vol. 206. P. 5096–5102. https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2012.06.035
- 92. Wan H. Corrosion behavior of Al0.4CoCu0.6NiSi0.2Ti0.25 high-entropy alloy coating via 3D printing laser cladding in a sulphur environment / H. Wan, D. Song, X. Shi, Y. Cai, T. Li, C. Chen // Journal of Materials Science & Technology. – 2021. – Vol. 60. – P. 197–205. https://doi.org/10.1016/j.jmst.2020.07.001
- Barron P. Towards V-based high-entropy alloys for nuclear fusion applications / P. Barron, A. Carruthers, J. Fellowes, N. Jones, H. Dawson, E. Pickering // Scripta

Materialia. – 2020. – Vol. 176. – P. 12–16. https://doi.org/10.1016/j.scriptamat.2019.09.028

- 94. Guo Y. Microstructure and properties of in-situ TiN reinforced laser cladding CoCr2FeNiTix high-entropy alloy composite coatings / Y. Guo, X. Shang, Q. Liu // Surface and Coatings Technology – 2018. – Vol. 344. – P. 353–358. https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2018.03.035
- 95. Li X. Influence of NbC particles on microstructure and mechanical properties of AlCoCrFeNi high-entropy alloy coatings prepared by laser cladding / X. Li, Y. Feng, B. Liu, D. Yi, X. Yang, W. Zhang, G. Chen, Y. Liu, P. Bai // Journal of Alloys Compounds. – 2019. – Vol. 788. – P. 485–494. https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2019.02.223
- 96. Cheng J. Evolution of microstructure and mechanical properties of in situ synthesized TiC–TiB2/CoCrCuFeNi high entropy alloy coatings / J. Cheng, D. Liu, X. Liang, Y. Chen // Surface and Coatings Technology. – 2015. – Vol. 281. – P. 109–116. https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2015.09.049
- 97. Tsai D-C. Solid solution coating of (TiVCrZrHf)N with unusual structural evolution / D-C. Tsai, Z-C. Chang, L-Y. Kuo, T-J. Lin, T-N. Lin, F-S. Shieu // Surface and Coatings Technology. – 2013. – Vol. 217. – P. 84–87. https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2012.11.077
- 98. Chang S-Y. 4-nm thick multilayer structure of multicomponent (AlCrRuTaTiZr)Nx as robust diffusion barrier for Cu interconnects / S-Y. Chang, C-E. Li, S-C. Chiang, Y-C. Huang // Journal of Alloys Compounds. – 2012. – Vol. 515. – P. 4–7. https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2011.11.082
- 99. Guo Y. A novel biomedical high-entropy alloy and its laser-clad coating designed by a cluster-plus-glue-atom model / Y. Guo, X. Li, Q. Liu // Materials & Design. 2020. Vol. 196. A. 109085. https://doi.org/10.1016/j.matdes.2020.109085
- 100. Qiu X. Effect of Ti content on structure and properties of Al2CrFeNiCoCuTix high entropy alloy coatings / X. Qiu, Y. Zhang, C. Liu // Journal of Alloys Compounds. – 2014. – Vol. 585. – P. 282–286.
- https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2013.09.083
  101. Nam S. Recent studies of the laser cladding of high entropy alloys./ S. Nam, C. Kim, Y-M. Kim // Journal of Welding and Joining. 2017. Vol. 35. P. 58–66. https://doi.org/10.5781/JWJ.2017.35.4.9
- 102. Yue T. Solidification behaviour in laser cladding of AlCoCrCuFeNi high-entropy alloy on magnesium substrates / T. Yue, H. Xie, X. Lin, H. Yang, G. Meng // Journal of Alloys Compounds. – 2014. – Vol. 587. – P. 588–593. https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2013.10.254
- Katama S. Laser assisted high entropy alloy coating on aluminum: microstructural evolution / Katakam, S. Joshi, S. Mridha, S. Mukherjee, N. Dahotre // Journal of Applied Physics. – 2014. – Vol. 116. – A. 104906. https://doi.org/10.1063/1.4895137
- 104. Shon Y. Laser additive synthesis of high entropy alloy coating on aluminum: corrosion behavior / Y. Shon, S. Joshi, S. Katakam, R. Rajamure, N. Dahotre // Materials Letters. 2015. Vol. 142. P. 122–125. https://doi.org/10.1016/j.matlet.2014.11.161
- 105. Velasco S. Functional properties of ceramic-Ag nanocomposite coatings produced by magnetron sputtering / S. Velasco, A. Cavaleiro, S. Carvalho // Progress in Materials Science. – 2016. – Vol. 84. – P. 158–191. https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2016.09.005

106. Frey H. H.R. Handbook of Thin Film Technology / H. Frey, H. Khan. – Berlin: Springer, 2010. – 380 p.

- 107. Lai C-H. Mechanical and tribological properties of multi element (AlCrTaTiZr)N coatings / C-H. Lai, K-H. Cheng, S-J. Lin, J-W. Yeh // Surface and Coatings Technology. – 2008. – Vol. 202. – P. 3732–3738. https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2008.01.014
- 108. Luo D. Design and Characterization of self-lubricating refractory high entropy alloy based multilayered films / D. Luo, Q. Zhou, W. Ye, C. Greiner, Y. He, H. Wang // ACS Applied Materials & Interfaces. 2021. Vol. 13. P. 55712–55725. https://doi.org/10.1021/acsami.1c16949
- 109. Lu P. Computational materials design of a corrosion resistant high entropy alloy for harsh environments / P. Lu, J. Saal, G. Olson, T. Li, O. Swanson, G. Frankel, A. Gerard, K. Quiambao, J. Scully // Scripta Materialia. – 2018. – Vol. 153. – P. 19–22.
- https://doi.org/10.1016/j.scriptamat.2018.04.040 110. Dou D. Coatings of FeAlCoCuNiV high entropy alloy / D. Dou, X. Li, Z. Zheng, J. Li // Surface Engineering. – 2016. – Vol. 32. – P. 766–770. https://doi.org/10.1080/02670844.2016.1148380
- 111. Zhao S. Mechanical and high-temperature corrosion properties of AlTiCrNiTa high entropy alloy coating prepared by magnetron sputtering for accident-tolerant fuel cladding / S. Zhao, C. Liu, J. Yang, W. Zhang, L. He, R. Zhang, H. Yang, J. Wang, J. Long, H. Chang // Surface and Coatings Technology. – 2021. – Vol. 417. – A. 127228. https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2021.127228
- 112. Padamata S. Magnetron Sputtering High-Entropy Alloy Coatings: A Mini-Review / S. Padamata, A. Yasinskiy, V. Yanov, G. Saevarsdottir // Metals. – 2022. – Vol. 12. – A. 319. https://doi.org/10.3390/met12020319
- 113. Yurov M. High entropic coatings FeCrNiTiZrAl and their properties / V. Yurov, A. Berdibekov, N. Belgibekov, K. Makhanov // Bulletin of the university of Karaganda-Physics. – 2021. – Vol. 3. – P. 101–114. https://doi.org/10.31489/2021Ph3/101-114
- 114. Lai C-H. Preparation and characterization of AlCrTaTiZr multi-element nitride coatings / C-H. Lai, S-J. Lin, J-W. Yeh, S-Y. Chang // Surface and Coatings Technology. – 2006. – Vol. 201. – P. 3275–3280. https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2006.06.048
- 115. Chen T. Nanostructured nitride films of multi-element high-entropy alloys by reactive DC sputtering / T. Chen, T. Shun, J. Yeh, M. Wong // Surface and Coatings Technology. – 2004. – Vol. 188–189. – P. 193–200. https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2004.08.023
- 116. Ren B. Structure and mechanical properties of multielement (AlCrMnMoNiZr)Nx coatings by reactive magnetron sputtering./ B. Ren, Z. Shen, Z. Liu // Journal of Alloys Compounds. – 2013. – Vol. 560. – P. 171–176. https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2013.01.148
- 117. Tsai D-C. Oxidation resistance and characterization of (AlCrMoTaTi)-Six-N coating deposited via magnetron sputtering / D-C. Tsai, M-J. Deng, Z-C. Chang, B-H. Kuo, E-C. Chen, S-Y. Chang, F-S. Shieu // Journal of Alloys Compounds. – 2015. – Vol. 647. – P. 179–188. https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2015.06.025
- Zhang W. Preparation, structure, and properties of highentropy alloy multilayer coatings for nuclear fuel cladding: A case study of AlCrMoNbZr/(AlCrMoNbZr)N / W. Zhang, R. Tang, Z. Yang, C. Liu, H. Chang, J. Yang, J. Liao, Y. Yang, N. Liu // Journal of Nuclear Materials. –

2018. - Vol. 512. - P. 15-24.

https://doi.org/10.1016/j.jnucmat.2018.10.001

- 119. Li H. Controllable electrochemical synthesis and magnetic behaviors of Mg–Mn–Fe–Co–Ni–Gd alloy films / H. Li, H. Sun, C. Wang, B. Wei, C. Yao, Y. Tong, H. Ma // Journal of Alloys Compounds. – 2014. – Vol. 598. – P. 161–165. https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2014.02.051
- 120. Soare V. Electrochemical deposition and microstructural characterization of AlCrFeMnNi and AlCrCuFeMnNi high entropy alloy thin films / V. Soare, M. Burada, I. Constantin, D. Mitrica, V. Badilita, A. Caragea, M. Tarcolea // Applied Surface Science. – 2015. – Vol. 358. – P. 533–539. https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2015.07.142
- 121. Yao C. Facile preparation and magnetic study of amorphous Tm-Fe-Co-Ni-Mn multicomponent alloy nanofilm / C. Yao, B. Wei, P. Zhang, X. Lu, P. Liu, Y. Tong // Journal of Rare Earths. 2011. Vol. 29. P. 133–137. https://doi.org/10.1016/S1002-0721(10)60418-8
- Liu L. Effects of temperature and atmosphere on microstructure and tribological properties of plasma sprayed FeCrBSi coatings / L. Liu, J-K. Xiao, X. Wei, Y. Ren, G. Zhang, C. Zhang // Journal of Alloys Compounds. – 2018. – Vol. 753. – P. 586–594. https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2018.04.247
- 123. Wang R. Effect of spraying parameters on the crystallinity and microstructure of solution precursor plasma sprayed coatings / R. Wang, J. Duan, F. Ye // Journal of Alloys Compounds. 2018. Vol. 766. P. 886–893. https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2018.06.331
- 124. Rakhadilov B. Influence of pulse plasma treatment on the phase composition and microhardness of detonation coatings based on Ti-Si-C / B. Rakhadilov, D. Buitkenov, M. Adilkhanova, Zh. Sagdoldina, Sh. Kurbanbekov // Bulletin of Karaganda University. – 2021. – Vol. 2. – P. 33–39. https://doi.org/10.31489/2021Ph2/33-39.
- 125. Tian L. Microstructure, Microhardness, and Wear Resistance of AlCoCrFeNiTi/Ni60 Coating by Plasma Spraying / L. Tian, Z. Feng, W. Xiong // Coatings. – 2018. – Vol. 8. – A. 112.
- https://doi.org/10.3390/coatings8030112
  126. Jin G. Microstructure and Tribological Properties of In Situ Synthesized TiN Reinforced Ni/Ti Alloy Clad Layer Prepared by Plasma Cladding Technique / G. Jin, Y. Li, H. Cui, X. Cui, Z. Cai // Journal of Materials Engineering and Performance. – 2016. – Vol. 25. – P. 2412–2419. https://doi.org/10.1007/s11665-016-2058-8
- 127. Sudha C. Microchemical and microstructural studies in a PTA weld overlay of Ni–Cr–Si–B alloy on AISI 304 L stainless steel / C. Sudha, P. Shankar, R. Rao, R. Thirumurugesan, M. Vijayalakshmi, R. Baldev // Surface and Coatings Technology. – 2008. – Vol. 202. – P. 2103– 2112. https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2007.08.063
- 128. Löbel M. Microstructure and Wear Resistance of AlCoCrFeNiTi High-Entropy Alloy Coatings Produced by HVOF / M. Löbel, T. Lindner, T. Mehner, L. Thomas // Coatings. – 2017. – Vol. 7. – A. 144. https://doi.org/10.3390/coatings7090144
- 129. Hsu W-L. On the study of thermal-sprayed Ni0.2Co0.6Fe0.2CrSi0.2AlTi0.2 HEA overlay coating / W-L. Hsu, H. Murakami, J-W. Yeh, A-C. Yeh, K. Shimoda // Surface and Coatings Technology. – 2017. – Vol. 316. – P. 71–74. https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2017.02.073

- Chen L. Wear behavior of HVOF-sprayed Al0.6TiCrFeCoNi high entropy alloy coatings at different temperatures / L. Chen, K. Bobzin, Z. Zhou, L. Zhao, M. Ote, T. Königstein, Z. Tan, D. He // Surface and Coatings Technology. – 2019. – Vol. 358. – P. 215–222. https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2018.11.052
- 131. Huang C. Microstructural evolution and mechanical properties enhancement of a cold-sprayed CuZn alloy coating with friction stir processing / C. Huang, W. Li, Y. Feng, Y. Xie, M-P. Planche, H. Liao, G. Montavon // Materials Characterization. – 2017. – Vol. 125. – P. 76– 82. https://doi.org/10.1016/j.matchar.2017.01.027
- 132. Yin S. Deposition of FeCoNiCrMn high entropy alloy (HEA) coating via cold spraying/ S. Yin, W. Li, B. Song, X. Yan, M. Kuang, Y. Xu, K. Wen, R. Lupoi // Journal of Materials Science & Technology. – 2019. – Vol. 35. – P. 1003–1007. https://doi.org/10.1016/j.jmst.2018.12.015
- 133. Yang K. Cold sprayed AA2024/Al2O3 metal matrix composites improved by friction stir processing: Microstructure characterization, mechanical performance and strengthening mechanisms / K. Yang, W. Li, P. Niu, X. Yang, Y. Xu // Journal of Alloys and Compounds. – 2018. – Vol. 736. – P. 115–123. https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2017.11.132

- 134. Huang C. Effect of tool rotation speed on microstructure and microhardness of friction-stir-processed cold-sprayed SiCp/Al5056 composite coating/ C. Huang, W. Li, Z. Zhang, M. Fu, M. Planche, H. Liao, G. Montavon // Journal of Thermal Spray Technology. – 2016. – Vol. 25. – P. 1357–1364. https://doi.org/10.1007/s11666-016-0441-5
- 135. Liao W-B. Microstructures and mechanical properties of CoCrFeNiMn high-entropy alloy coatings by detonation spraying / W-B. Liao, Z-X. Wu, W. Lu, M. He, T. Wang, Z. Guo, J. Huang // Intermetallics. – 2021. – Vol. 132. – A. 107138. https://doi.org/10.1016/j.intermet.2021.107138
- 136. Ulianitsky V. Structure and composition of Fe-Co-Ni and Fe-Co-Ni-Cu coatings obtained by detonation spraying of powder mixtures / V. Ulianitsky, D. Rybin, A. Ukhina, B. Bokhonov, D. Dudina, M. Samodurova, E. Trofimov // Materials Letters. – 2021. – Vol. 290. – A. 129498. https://doi.org/10.1016/j.matlet.2021.129498
- Batraev I. A Feasibility Study of High-Entropy Alloy Coating Deposition by Detonation Spraying Combined with Laser Melting / I. Batraev, V. Ulianitsky, A. Sova, M. Samodurova, E. Trofimov, K. Pashkeev, A. Malikov, D. Dudina, A. Ukhina // Materials. – 2022. – Vol. 15. – A. 4532. https://doi.org/10.3390/ma15134532

## ЖОҒАРЫ ЭНТРОПИЯЛЫҚ ҚОРЫТПАЛАР ТҰЖЫРЫМДАМАСЫНА ШОЛУ

## Е.Е. Камбаров<sup>1,2)</sup>, Г.К. Уазырханова<sup>1)</sup>, М. Рутковска-Горчица<sup>3)</sup>, А.Е. Кусайнов<sup>1)</sup>

Дәулет Серікбаев атындағы Шығыс Қазақстан техникалық университеті, Өскемен, Қазақстан
 Әскемен қаласындағы химия-биология бағытындағы Назарбаев Зияткерлік мектебі, Өскемен, Қазақстан
 Вроцлав ғылым және технология университеті, Вроцлав, Польша

Мақалада жоғары энтропиялық қорытпаларды зерттеу нәтижелеріне шолу жасалады, олардың пайда болу принциптерін, жоғары энтропиялық қорытпалардың корытпалардың негізгі түсініктері мен қасиеттерін сипаттайды. Энтропиялық қорытпалардың қолданыстағы санаттары келтірілген. Жоғары энтропиялық қорытпалардың пайда болуынан туындайтын әсерлер сипатталған: жоғары энтропия, тордың бұрмалануы, баяу диффузия және араластыру әсері. Көп компонентті қорытпаларға арналған дәстүрлі термодинамикалық көріністер толықтыруды қажет етеді. Сондай-ақ, жоғары энтропиялық қорытпалардың фазалық құрамын болжау үшін Юм-Розери ережесін қолдану кейбір қиындықтарды көрсетеді, өйткені тор мен валенттіліктің бірдей түріне ие көптеген элементтерді таңдау қиын. Зерттеушілердің пікірінше, жоғары энтропиялық қорытпалардың құрылымдақ қүйіне әсер ететін бірқатар параметрлер мен жағдайларды талдау нәтижелері сипатталған. Әдеби деректерді талдау көрсеткендей, қазіргі уақытта көп компонентті қорытпалар жүйелерінде құрылымдардың қалыптасуын дұрыс болжауға мүмкіндік беретін жоғары энтропиялық қорытпалардың қалыптасуын дұрыс болжауға мүмкіндік беретін қорытпалар жүйелерінде құрылымдардың қалыптасуын дұрыс болжауға қазіргі уақытта көп компонентті қорытпалар жүйелерінде құрылымдардың қалыптасуын дұрыс болжауға қазіргі уақытта көп компонентті қорытпалар жүйелерінде құрылымдардың қалыптасуын дұрыс болжауға қазіргі уақытта көп компонентті қорытпалар жүйелерінде құрылымдардың қалыптасуын дұрыс болжауға мүмкіндік беретін ақтара талдау нәтижелері сипатталған. Әдеби деректерді талдау көрсеткендей, қазіргі уақытта көп компонентті қорытпалар жүйелерінде құрылымдардың қалыптасуын дұрыс болжауға мүмкіндік беретін әйбебап параметр жоқ. Жоғары энтропиялық қорытпалардың ұнтақтарын дайындау әдістері ұсынылған. Лазерлік балқыту, магнетронды бүрку, электрохимиялық тұндыру және газ-термиялық бүрку сияқты жоғары энтропиялық қерітері алудан алудың жиі қолданылатын әдістерінің нәтижелері қарастырды қарастырды қарастырда қарастыры қарастыр қарастыра қарастыртері қарастырда қарастыр

**Түйін сөздер:** жоғары энтропиялық қорытпалар, көп компонентті қорытпалар, термодинамика, құрылым, жабу әдістері.

## ОБЗОР КОНЦЕПЦИИ ВЫСОКОЭНТРОПИЙНЫХ СПЛАВОВ

Е.Е. Камбаров<sup>1,2)</sup>, Г.К. Уазырханова<sup>1)</sup>, М. Рутковска-Горчица<sup>3)</sup>, А.Е. Кусайнов<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup> Восточно-Казахстанский технический университет им. Д. Серикбаева, Усть-Каменогорск, Казахстан <sup>2)</sup> Назарбаев Интеллектуальная школа химико-биологического направления г. Усть-Каменогорск, Усть-Каменогорск, Казахстан <sup>3)</sup> Вроцлавский университет науки и технологий, Вроцлав, Польша

В статье представлен обзор результатов исследований высокоэнтропийных сплавов, описывающие принципы их образования, базовые понятия и свойства высокоэнтропийных сплавов. Перечислены существующие категории энтропийных сплавов. Описаны эффекты, возникающие вследствие образования высокоэнтропийных сплавов: высокая энтропия, искажение решетки, замедленная диффузия и эффект перемешивания. Отмечается, что традиционные термодинамические представления для многокомпонентных сплавов требуют дополнения. Также отмечается, что применение правил Юм-Розери для предсказывания фазового состава высокоэнтропийных сплавов показывает некоторые затруднения, так как трудно подобрать большое количество элементов, имеющих одинаковый тип решетки и валентности. Описаны результаты анализа ряда параметров и условий, которые, по мнению исследователей, влияют на структурное состояние создаваемых высокоэнтропийных сплавов, учет которых мог бы позволить корректно предсказать формирование структур в высокоэнтропийных сплавах. Анализ литературных данных показал, что в настоящее время не существует универсального параметра, который мог бы позволить корректно предсказать формирование структур в многокомпонентных системах сплавов. Представлены методы подготовки порошков высокоэнтропийных сплавов. Рассмотрены результаты работ часто используемых методов получения покрытий на основе высокоэнтропийных сплавов, таких как лазерная наплавка, магнетронное напыление, электрохимическое осаждение и термическое напыление. Описаны недостатки при получении покрытий данными методами.

**Ключевые слова:** высокоэнтропийные сплавы, многокомпонентные сплавы, термодинамика, структура, методы покрытия.

#### <u>https://doi.org/10.52676/1729-7885-2023-1-40-47</u> УДК 658.012.011.56:658.512

## РАЗРАБОТКА ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ДЛЯ ПОДСИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ НАГРЕВАТЕЛЯМИ И ПОДСИСТЕМЫ КОНТРОЛЯ ПАРАМЕТРОВ ЖИДКОГО НАТРИЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО СТЕНДА EAGLE

#### С.А. Ильиных, А.В. Сысалетин, В.А. Ермаков, А.Б. Азбергенова, Р.Ж. Наурызбаев, Р.С. Исламов

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

#### E-mail для контактов: ilinykh@nnc.kz

С начала 2022 года и по настоящее время в филиале «Институт атомной энергии» РГП «Национальный ядерный центр Республики Казахстан» проводятся работы по модернизации подсистем управления нагревателями и контроля параметров жидкого натрия информационно-управляющей системы экспериментального стенда «EAGLE». В рамках этой работы было смонтировано приобретенное оборудование, произведена первичная настройка модулей и корзин расширения с помощью специализированного программного обеспечения Modbus Utility идущего в комплекте поставки, и разработано программное обеспечение.

**Ключевые слова:** информационно-управляющая система; система управления нагревателями; система специзмерений; модуль; корзина расширения; автоматизированное рабочее место.

#### Введение

Объектом исследования в данной работе является ИУС экспериментального стенда EAGLE в части подсистемы управления нагревателями и подсистемы контроля параметров жидкого натрия (подсистема специзмерений).

Учитывая продолжительное время эксплуатации текущего оборудования второго уровня ИУС, все оборудование к настоящему времени многократно выработало свой ресурс и перешло в предельное состояние, то есть состояние, при котором его ремонт или замена на аналогичное является нецелесообразным [1]. В таблице 1 рассмотрены показатели надежности для оборудования устаревших подсистем.

Таблица 1. Показатели надежности устаревшей подсистемы

Компонент системы	Время вос- становления (tв), ч	Наработка компонента на отказ (tcp), ч	Средний срок службы, лет	
Контроллер	4	100000	10	
Модуль аналогового ввода PCI 1713	2	64770	10	
Модуль аналогового ввода UNIO96-5	2	100000	10	

В таблице 2 представлены показатели надежности для оборудования модернизированных подсистем. Как можно заметить, все оборудование обладает большим временем наработки компонента на отказ, то есть временем работы компонента после восстановления до следующего отказа. Также оно обладает значительно меньшим временем восстановления. Время замены одного модуля не превышает 5 минут, при этом не нужно вносить какие-либо изменения в программу. Все оборудование доступно, его можно приобрести на свободном рынке в любой момент. Следует отметить, что в комплекте имеется запас модулей, шасси и контроллеров.

Компонент системы	Время вос- становления (t <sub>в</sub> ), мин	Наработка компонента на отказ (tcp), ч	Средний срок службы, лет
Шасси ЕТ-87Р8-МСТР	15	200000	10
Контроллер ICP DAS WP-8841	15	200000	10
Модуль аналогового ввода I-87019RW	5	200000	10
Модуль аналогового вывода I-87024CR	5	200000	10
Высокочастотный модуль аналогового ввода I-8017HCW	5	200000	10

Таблица 2. Показатели надежности новых подсистем

Также необходимо сравнить такой показатель, как разрядность преобразователей, который напрямую влияет на точность преобразования.

Разрядности для старого и нового оборудования приведены ниже:

- модуль аналогового ввода PCI 1713 12 бит;
- модуль аналогового вывода Adam 4021-12 бит;
- модуль аналогового ввода I-87019RW 14 бит;
- модуль аналогового вывода I-87024CR 16 бит;

Из данных показателей можно сделать вывод о том, что точность преобразования для аналогового вывода выше на проектируемой и внедряемой системе в 4 раза (при выборе одинакового предела на обоих модулях в 0–10 В, разрешение на старом модуле будет 2,44 мВ, а на новом модуле 0,61 мВ). Точность преобразования для аналогового ввода выше на новой системе в 16 раз (при выборе одинакового предела на обоих модулях в 0–10 В, разрешение на старом модуле будет 2,44 мВ, а на новом модуле 0,15 мВ).

#### Разработка программного обеспечения

В качестве средства программирования и разработки графических экранов АРМ операторов выбран программный продукт Trace Mode 6. Инструментальная система Trace Mode 6 состоит из интегрированной среды разработки и отладочного монитора реального времени – профайлера [2].

Основой программного обеспечения разработанного в данной SCADA системе являются каналы. Канал – это базовое понятие Trace Mode 6. Работа среды исполнения (MPB) заключается в анализе каналов и выполнении по результатам анализа определенных действий в режиме реального времени (запись данных с внешних устройств, отправка данных на внешние устройства, запись данных в архив, вызов графического экрана на дисплей и т.п.). В каналах осуществляется преобразование данных. Совокупность всех каналов называется база каналов, она составляет математическую основу программного обеспечения всех узлов проекта.

В программу добавлены и настроены каналы для 18 нагревателей (рисунок 1). Созданы каналы для индикации работы нагревателей на экране оператора и каналы управления.

Помимо созданных каналов, также необходимо добавить в программу специфические каналы, выполняющие функцию отправки/приема данных с модулей ввода/вывода сигналов.

В данном случае отправка данных на каналы модулей вывода аналоговых сигналов происходит по протоколу Modbus, поэтому были созданы дополнительные каналы выполняющие функции 06 Modbus (Write AI, Write Output Registers) [3].

Modbus – это открытый коммуникационный протокол, основанный на архитектуре «ведущий – ведомый» (англ. master-slave; в стандарте Modbus используются термины client-server). Широко применяется в промышленности для организации связи между электронными устройствами. Может использоваться для передачи данных через последовательные линии связи RS-485, RS-422, RS-232 и сети TCP/IP (Modbus TCP). Основные достоинства стандарта – открытость и массовость. В настоящее время промышленностью выпускается очень много типов и моделей датчиков, исполнительных устройств, модулей обработки и нормализации сигналов и др. Практически все промышленные системы контроля и управления имеют программные драйверы для работы с Modbus-сетями.

Все каналы разбиты по группам (рисунок 2).

Для удобства нахождения расположения каналов на модуле, при проведении пуско-наладочных работ, в программе они были разбиты на группы Module «номер модуля», соответствующие их физическому расположению (подключению).

После добавления в проект всех необходимых каналов можно приступать к разработке логики программного обеспечения. Программа управления нагревателями, разработана на языке FBD. FBD (англ. Function Block Diagram) – графический язык программирования стандарта МЭК 61131-3. Предназначен для программирования программируемых логических контроллеров (ПЛК). Программа образуется из списка цепей, выполняемых последовательно сверху вниз. Цепи могут иметь метки. Инструкция перехода на метку позволяет изменять последовательность выполнения цепей для программирования условий и циклов.



Рисунок 1. Созданные в ПО каналы

Каждая отдельная цепь представляет собой выражение, составленное графически из отдельных элементов. К выходу блока подключается следующий блок, образуя цепь. Внутри цепи блоки выполняются строго в порядке их соединения. Результат вычисления цепи записывается во внутреннюю переменную либо подается на выход ПЛК.

Часть программы управления нагревателями представлена на рисунке 3.



## Рисунок 2. Каналы Modbus



Рисунок 3. Программа управления нагревателями



Рисунок 4. Логика программы управления нагревателями

В программе предусмотрена возможность управления нагревателями тремя разными способами:

 Первый – в автоматическом режиме по закону ПИД-регулирования;

2) Второй – в автоматическом режиме используя двухпозиционное (релейное) управление;

3) Третий – в ручном режиме, имея возможность выставления любого уровня мощности от 0 до 100 процентов. Этот режим будет необходим для дальнейшего снятия кривой разгона и определения параметров передаточной функции объекта управления (это необходимо для расчета параметров настройки ПИД-регулятора).

Выбор режима управления обеспечивается с помощью дополнительно созданных функциональных блоков Heater\_control и Vibor. Данные блоки были разработаны на языке ST.

Блок-схема, описывающая логику работы программы. представлена на рисунке 4. Данная блоксхема описывает работу сразу всей цепочки из блоков Heater\_control, PID и Vibor.

При первом и втором способе управления система принимает вид замкнутой (с обратной связью), представленной на рисунке 5, где объект управления (нагреваемы участок) описывается как апериодическое звено первого порядка с передаточной функцией:

$$W\left(s\right) = \frac{k}{Ts+1}$$

где: *k* – коэффициент усиления звена, *T* – постоянная времени, характеризующая инерционность звена.

ПИД-регулятор имеет передаточную функцию:

$$R(s) = K + \frac{1}{T_i s} + T_d s$$

где: *К* – пропорциональный коэффициент, *T<sub>i</sub>* – постоянная интегрирования, *T<sub>d</sub>* – постоянная дифференцирования.



Рисунок 5. Замкнутая система (с обратной связью)

Один из способов расчета параметров регулятор — это определение параметров графическим методом по кривой в позиционном режиме регулирования. Далее представлен расчет для первой зоны нагрева (с контрольной точкой Н.Т.44). Для начала включается нагрев в позиционном (релейном) режиме регулирования.

В установившемся режиме колебаний температуры измеряется период т колебаний температуры (время между соседними максимальными или минимальными значениями температуры). Измеряется также полный размах колебаний температуры  $\Delta T = T_{max} - T_{min}$  (разность максимального и минимального значений температуры). Дялее по таблице 3 определяются значения коэффициентов  $K_p$ ,  $T_i$ ,  $T_d$ .

Тип регулирования	Пропорцио- нальный коэфициент	Постоянная интегриро- вания	Постоянная дифференци- рования		
П	1,4·ΔT	-	-		
П + И	1,6·ΔT	2,4 т	-		
П + И + Д	1,2·ΔT	1,5∙т	0,2 т		

Таблица 3. Параметры настройки регулятора

В итоге получаем параметры настройки регулятора для первой зоны  $K_p - 9, 6, T_i - 630, T_d - 84.$ 

По аналогии с программой для управления нагревателями, на языке FBD была разработана программа для контроля параметров жидкого натрия и управления током на датчики пустот (кипения) (рисунок 7).

Для данной программы были созданы дополнительные функциональные блоки PGN\_ypr и PGN\_con.

Блок PGN\_con реализует функции пересчета входных электрических величин в физические для любого из возможных датчиков подсистемы ПЖН (рисунок 8).



Рисунок 6. Установившиеся колебания температуры



Рисунок 7. Часть программы ПЖН (подсистемы контроля параметров жидкого натрия)

#### РАЗРАБОТКА ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ДЛЯ ПОДСИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ НАГРЕВАТЕЛЯМИ И ПОДСИСТЕМЫ КОНТРОЛЯ ПАРАМЕТРОВ ЖИДКОГО НАТРИЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО СТЕНДА EAGLE



Рисунок 8. Блок PGN\_con



Рисунок 9. Экран управления нагревателями

Выбор функции пересчета осуществляется с помощью параметра func id:

- при 1 датчик пустот (напряжение);
- при 2 датчик пустот (ток);
- при 3 пропорциональный пересчет;
- при 4 уровнемер УН-500;
- при 5 уровнемер УН-800;
- при 6 датчик импульсного давления (ДИД);
- при 7 датчик статического давления (ДСД);
- при 8 датчик давления Gefran;
- при 9 магнитный расходомер РМ-100-01.

Блок PGN\_ypr peanusyer функцию «2» блока PGN\_con.

Следующий этап разработки программы, это разработка графических экранов операторов. В рамках настоящей работы разработан экран для управления нагревателями (рисунок 9). Экран составляется из уже предусмотренных в инструментальной среде графических элементов [4].

На рисунке 10 представлен экран подсистемы контроля параметров жидкого натрия. В верхней ча-

сти отображается текущие дата и время, название мнемосхемы и информационно-управляющей системы, а также расположена кнопка для перехода на главный экран. Данные с датчиков пустот и 5-зонного уровнемера дополнительно, для лучшей наглядности, отображаются на графиках.

Для датчиков пустот реализовано управление током. Управление осуществляется по нажатию на текстовый элемент со значением тока (во всплывающем окне) либо по нажатию на стрелки, при этом нажатие на соответствующую стрелку выделятся цветом (рисунок 11).

По аналогии со старой системой, управление током осуществляется в диапазоне от 0 до 300 мА.

В настоявшее время идет монтаж новой ИУС, к модулям ввода/вывода подключаются датчики установки, производится прокладка кабелей. Параллельно идет проверка подключенных измерительных каналов, в данный момент уже полностью задействовано и проверено 136 каналов измерения температуры.



Рисунок 10. Экран ПЖН



Рисунок 11. Управление током

## Заключение

В результате выполнения данной работы на установке будет внедрена качественно новая информационно–управляющая система. На данный момент смонтировано приобретенное оборудование, произведена первичная настройка модулей и корзин расширения с помощью специализированного программного обеспечения. Завершена разработка программного обеспечения для пересчета электрических сигналов первичных преобразователей в физические величины для подсистемы контроля параметров жидкого натрия, завершена разработка и программы управления нагревателями, разработка и программирование консолей операторов для подсистем контроля параметров жидкого натрия и управления нагревателями.

За счет применения современного оборудования и программного обеспечения будут достигнуты значительно большее быстродействие и надежность системы, а также обеспечена возможность ее наращи-

вания, что приведет к повышению качества научных исследований, проводимых на этом стенде.

Применение SCADA-системы позволит создать экраны операторов с высокими эргономическими характеристиками и большой информационной емкостью. Благодаря регистрации экспериментальных данных в цифровом виде, упрощается их обработка и дальнейшие расчеты.

## Литература

- 1. ГОСТ 27.002-2015 Надежность в технике.
- Ильиных С.А., Сысалетин А.В., Ермаков В.А., Кудранова А.Б., Наурызбаев Р.Ж., Модернизация информационно-управляющей системы экспериментального стенда «EAGLE» – Вестник НЯЦ РК, – 2019, – вып. 4, – с. 38–44.
- 3. WinPAC-8000 User Manual (For Standard WP-8000) Version 2.0.9. – 2014 ICP DAS Co., Ltd.
- 4. Руководство пользователя SCADA Trace Mode 6. Том 1. 14 издание. Москва, 2011.

#### REFERENCES

- 1. GOST 27.002-2015 Nadezhnost' v tekhnike.
- Il'inykh S.A., Sysaletin A.V., Ermakov V.A., Kudranova A.B., Nauryzbaev R.Zh., Modernizatsiya informatsionnoupravlyayushchey sistemy eksperimental'nogo stenda "EAGLE" – Vestnik NYaTs RK, – 2019., Issue 4, P. 38–44.
- 3. WinPAC-8000 User Manual (For Standard WP-8000) Version 2.0.9. – 2014 ICP DAS Co., Ltd.
- 4. Rukovodstvo pol'zovatelya SCADA Trace Mode 6. Tom 1. 14 izdanie. – Moscow, 2011.

## ЕAGLЕ ЭКСПЕРИМЕНТТІК СТЕНДІНІҢ ЖЫЛЫТҚЫШТАРДЫ БАСҚАРУДЫҢ ІШКІ ЖҮЙЕСІ МЕН СҰЙЫҚ НАТРИЙ ПАРАМЕТРЛЕРІН БАСҚАРУДЫҢ ІШКІ ЖҮЙЕСІНЕ АРНАЛҒАН БАҒДАРЛАМАЛЫҚ ЖАСАҚТАМА ЖАСАУ

## С.А. Ильиных, А.В. Сысалетин, В.А. Ермаков, А.Б. Азбергенова, Р.Ж. Наурызбаев, Р.С. Исламов

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

2022 жылдың басынан бастап қазіргі уақытқа дейін «Қазақстан Республикасының Ұлттық ядролық орталығы» РМК «Атом энергиясы институты» филиалында «EAGLE» эксперименттік стендінің ақпараттық-басқару жүйесінің қыздырғыштарды басқару және сұйық натрий параметрлерін бақылау кіші жүйелерін жаңғырту бойынша жұмыстар жүргізілуде. Осы жұмыстың аясында сатып алынған жабдық орнатылды, модульдер мен кеңейту қоржындары жиынтықта бірге жүретін Modbus Utility арнайы бағдарламалық жасақтаманың көмегімен алғашқы реттеуі жүргізілді және бағдарламалық жасақтама жасалды.

**Түйін сөздер:** ақпараттық басқару жүйе; қыздырғыштарды басқару жүйесі; арнайы өлшеу жүйесі; модуль; кеңейту қоржыны; автоматтандырылған жұмыс орны.

## DEVELOPMENT OF SOFTWARE FOR THE HEATER CONTROL SUBSYSTEM AND THE LIQUID SODIUM PARAMETER MONITORING SUBSYSTEM OF THE EAGLE TEST-BENCH

## S.A. Ilinykh, A.V. Sysaletin, V.A. Yermakov, A.B. Azbergenova, R.Zh. Nauryzbaev, R.S. Islamov

## RSE NNC RK Branch "Institute of Atomic Energy", Kurchatov, Kazakhstan

Since the beginning of 2022 to date, the "Institute of Atomic Energy" Branch of the Republican State Enterprise "National Nuclear Center of the Republic of Kazakhstan" has been updating the subsystems to control heaters and monitor the parameters of liquid sodium of the information-control system of the EAGLE test-bench. As part of this activity, the purchased equipment was installed, the initial configuration of the modules and expansion baskets was made using the specialized Modbus Utility software supplied with the package, and the software was developed.

**Keywords:**information-control system; heater control system; system of special measurements; module; expansion basket; automated workplace.

## ТОҢАЗЫТҚЫШТЫҢ АҚАУ ЖАҒДАЙЫНДА ЖҰМЫС ІСТЕУ ПРИНЦИПІ

#### Д.Н. Нургалиев, М.В. Ермоленко, О.А. Степанова, А.Е. Сатыбалдинова

## «Семей қаласының Шәкәрім атындағы университеті» КЕ АҚ, Семей, Қазақстан

## Контактілерге арналған E-mail: daniarsemei@mail.ru

Қазіргі таңда жасанды суықты пайдалану әлемнің экономикалық, экологиялық және әлеуметтік өмірдің негізгі факторларының бірі болып табылады. Кез келген заманауи ғылым, техника және технологиялар жасанды суықсыз қамтамасыз ету мүмкін емес. Ал жасанды суық тоңазытқыш қондырғыларының көмегімен іске асырылады. Мақалада тоңазытқыш қондырғысының оңтайлы жұмыс істеу режимінде және жылуалмастрғышының ақаулығы кезінде жұмыс істеу принциптері қарастырылады. Әр түрлі келтірілген ақаулықтардың оңтайлы режим жұмысымен салыстырылып, қорынтындылар келтірілді. Барлық зерттеу жұмыстары эксперименттік жолмен жүргізілді, сонымен қатар жылу жүргізгішпен (тепловизер) дәлелденді. Толық мәліметтер кестелер мен диаграммалар түрінде келтірілді. Мәліметтерді сараптау нәтижесінде көп факторлы эксперимент әдісін пайдалану анықталды. Тоңазытқыштың әр бір ақау жағдайындағы процестеріне жекелей және жалпылама қорытынды жасалды.

## **Түйін сөздер:** тоңазытқыш қондырғы, ақаулық, көпфакторлы эксперимент, стационар режим, температура, салқындатқыш.

Қазіргі таңда жасанды суықты пайдалану әлемнің экономикалық және әлеуметтік өмірдің негізгі факторларының бірі болып табылады. Тоңазытқыш қондырғыларының көмегімен алынатын төменгі температуралар әр түрлі ғылым, техника және технология салаларында қолданылады. Жасанды суық тағам өндірісінде, химия, машина жасау, медицина, металлургия, газ және жеңіл көсіпорындарында, азаматтық құрылыста және басқа да аумақтарда қалыптасуы мен дамуына күшті әсер етуші факторға айналды. Жасанды суықтың көмегімен өндіріс аудандарының қашықтығына және маусымдылығына қарамастан көптеген миллиондаған адамдар үшін дұрыс тамақтану мүмкіндігі қамтамасыз етілуде [1].

Бүгін тоңазытқыш агенті ретінде негізінде әр түрлі фреондар пайдаланылады, мысалы, R134a, R417a. Ал жұмысшы зат ретінде пропан мен аммиак тек ірі өндірістік қондырғыларда тұтынылады [2].

Жабдықтың жұмысындағы ақаулықтарды болдырмау үшін аварияға дейінгі жағдайлардың туындауын және тоңазытқыш қондырғылардың жылу алмасу жүйелерінде салқындатқыштар көлемінің жетіспеушілігін болдырмау үшін тоңазытқыш жүйелерін диагностикалау жүргізіледі. Тоңазытқыш жүйесінің апат алды жағдайын нормал режимі жұмысынан ауытқу ретінде қарастыруға болады, олар қолайсыз жағдайда апатқа (авария) әкеп соқтыруы мүмкін [3].

Жобалау және монтаждау қателіктерін қоспағанда, тоңазытқыш қондырғыларының жұмыстарындағы ақаулар көбінесе тоңазытқыш машиналарды дұрыс эксплуатацияламаудан және тиімсіз техникалық қызмет көрсету кезінде пайда болады. Өндірістік компрессорлық агрегаттардың жұмыс режимін қате таңдағанда, сонымен қатар қоршаған ортаның параметрлерінің күрт өзгеруі кезінде ешқандай шара қолданбауы кезінде тоңазытқыш қондырғысының қалыпты жұмысы бұзылады.

Тоңазытқыш жүйесіндегі ақаулықтардың себептеріне байланысты оларды жою жолдары таңдалады. Істен шығудың түрлерін екі категорияға бөліп, қарастыруға болады. Бірінші істен шығу категориясының ішіне тікелей көруге және сезуге бола алатын ақауларды айтуға болады. Екінші істен шығу категориясына көрінбейтін, тек қана арнайы жабдықтардың көмегімен анықталатын апаттарды жатқызылады.

Тоңазытқыш жүйелерінің мүмкін болатын ақауларына мыналар жатады: электр тізбегінің ақауы; компрессорлардың ақауы; компрессордың жұмыс процесінде майдың жоғалуы; компрессордағы шу; қондырғының төмен өнімділігі; салқындатылған бөлмедегі температура алдын ала белгіленгеннен жоғары болуы; сору немесе сұйық құбыр мұзбен жабылған немесе тұмандану; төмен қысымды айдау және т.б. Әрбір ақаулықтың өзіндік себептері және оларды шешу жолдары бар.

Сондықтан стационар емес жағдайда қалыпты режим жұмысынан әр түрлі ауытқулары кезінде тоңазытқыш жүйесінің жабдықтарында жылуалмастырғыш процестерді зерттеу жұмыстары өзекті мәселе болып саналады.

Жұмыстың мақсаты ретінде тоңазытқыш қондырғысының жекелей ақаулықтарының жылуалмастырғыш қондырғысының жұмыс эффективтілігіне және оның энергия шығынына әсерін анықтау болып табылады.

Эксперименттік зерттеу жұмыстары Шәкәрім университетінің энергетикалық жүйелер зертханасында «Тоңазытқыш-2» атты стендінде (сурет 1, 2) жүргізілді.



1-сурет. «Тоңазытқыш-2» қондырғысының жалпы көрінісі



2-сурет. Тоңазытқыш камераның жүйесінде есептегіштердің сұлбасы мен орналасуы

2-суретте қара шаршы ретінде тоңазытқыш қондырғысының температурасын тіркейтін Dallas Semiconductor DS18B20 фирмалы есептегіштер (датчиктер) белгіленген. Ары қарай олардың белгіленулері мынадай түрде жазылады: бірінші есептегіш – 1 DT, екінші есептегіш – 2 DT және сол секілді.

Тоңазытқыш жүйесінің жұмыс жүйесіне әсер етуші негізгі факторлары ретінде қоршаған ортаның температурасының жиі өзгеруі және тоңазытқыш камераның жанама реттегіштің орналасуы (1-ден 6ға дейін) табылады. Температураның жанама реттегіші буландырғыштан шығардағы тоңазытқыш агент буының қанығу деңгейін реттеуге мүмкіндік береді.

Тоңазытқыш камераның жанама реттегіші мен қоршаған ортаның температурасының әсерінің сипаттамасын анықтау үшін көп факторлы эксперимент таңдалды [4].

Зерттеу жұмыстарын жүргізу үшін екі ауыспалы зерттеу факторы таңдалды:

 – Z<sub>1</sub> – қоршаған ортаның температурасы (293 Кнен 299 К-ге дейін);

Z<sub>2</sub> – мұздатқыш камерасында реттегіштің орналасуы (3-тен 6-ға дейін).

Бұл жағдайда өзгеретін функциялар ретінде келесілер қарастырылды:

 Y<sub>1</sub> – буландырғышта салқындатқыштың қайнау температурасы, К;

 Y<sub>2</sub> – конденсаторда салқындатқыштың конденсациялау температурасы, К;

 Y<sub>3</sub> – компрессормен электр энергияны тұтыну қуаты, Вт;

 Y<sub>4</sub> – стационар жұмыс режиміне шыққанға дейінгі жұмыс істеу уақыты (берілген температураға жету), с.

Машықтардың қажетті саны төменгі келтірілген формуламен анықталады:

$$N = n^k \tag{1}$$

мұнда, *k* – ауыспалы факторлардың саны.

Екі фактор үшін регрессияның теңдеуі келесі түрде жазылады:

$$Y_i = b_{0i} + b_{1i}x_1 + b_{2i}x_1x_2 \tag{2}$$

Эксперименттің жүргізу жоспары (жоспарлау матрицасы) 1-кестеде көрсетілген.

## 1-кесте. ПФЭ-2 бойынша экспериментті жүргізу жоспары

N⁰	<b>X</b> 0	<b>X</b> 1	<b>X</b> 2	<b>X</b> 1 <b>X</b> 2	<b>Z</b> 1	<b>Z</b> <sub>2</sub>	<b>Y</b> 1	Y <sub>2</sub>	Y₃	<b>Y</b> 4
1	+	-	I	+	295	3	265,0	314	104,6	304
2	+	+	I	I	301	3	264,5	315	105,8	315
3	+	-	+	-	295	6	263,5	317	106,8	365
4	+	+	+	+	301	6	262,5	317	107,9	378

Математикалық өндеу нәтижесінде регрессияның төмендегідей теңдеулері алынды:

$$\begin{split} Y_1 &= 263,875 - 0,375 \cdot X_1 - 0,875 \cdot X_2 - 0,125 \cdot X_1 \cdot X_2 \ (3) \\ Y_2 &= 315,75 + 0,25 \cdot X_1 + 1,25 \cdot X_2 - 0,25 \cdot X_1 \cdot X_2 \ (4) \\ Y_3 &= 106,275 + 0,575 \cdot X_1 + 1,075 \cdot X_2 - 0,025 \cdot X_1 \cdot X_2 \ (5) \\ Y_4 &= 340,5 + 6 \cdot X_1 + 31 \cdot X_2 + 0,5 \cdot X_1 \cdot X_2 \ (6) \end{split}$$

Барлық алынған функциялар 95% дәлдікпен барабар [5].

(3) теңдеудің сараптамасы бойынша буландырғыштағы температураға қоршаған ортаның температурасынан гөрі тоңазытқыш камерасының жанама температураны реттегіштің орналасуы көбірек әсер етеді. (4) теңдеудің сараптамасы бойынша конденсатордағы температураға жоғарыдағыдай тоңазытқыш камераның температурасын жанама реттегішінің орналасуы негізгі әсерін тигізетіні айқын. Қоршаған ортаның температурасы салыстырып айтқанда мүлдем әсер етпейді. Конденсация температурасына реттегіш факторлардың бірегей әсерлесуі, сонымен қатар жекелей тұрғыда алынған қоршаған ортаның температурасына әсері еш бір айтарлықтай әсерін тигізбейді.

(5) теңдеу қуатты тұтыну көрсеткіштері бойынша да қоршаған орта температурасына қарағанда тоңазытқыш камерасының температурасын жанама реттегіштің орналасуы үлкен рөлді атқаратының көрсетеді. Реттегіш факторлардың бірегей әсерлесуі мүлдем байқалмайды.

(6) теңдеудің сараптамасы бойынша стационар режимге шығуға дейінгі тоңазытқыштың жұмыс істеу уақытының ұзақтылығы параметрлерінде тоңазытқыш камерадағы температураны жанама реттегіштің орналасуы негізгі рөльді атқаратының көрсетеді.

Жалпы регрессияның теңдеу сараптамасы буландырғышта температураның негізін қалаушы критерий ретінде тоңазытқыш камерасының температурасын жанама реттегішінің орналасуы екені расталды.

Жүргізілген есептеулерге негізделе отырып, ары қарай эксперименттерді қоршаған ортасы 301 К (28 °С) температурасында және тоңазытқыш камераның температурасын жанама реттегіштің орналасуы «З» бағынасы кезінде жұмыстарды жүргізу орнықты болады деп шешілді, ол тоңазытқыш жүйесінің орташа оңтайлы суықты өндіруге сәйкес келеді.

Келесі шарттар үшін кезекті зерттеулер жүргізілді:

 тоңазытқыш жүйесінің оңтайлы жұмыс режимі;

 конденсаторда бітелудің болуы, капиллярлық түтіктің қатуы, фильтрдің толық бітелуі;

- коненсатордың жеткіліксіз өнімділігі.

Оңтайлы жұмыс режимін кезінде тоңазытқыштың жүйесіндегі тән нүктелер бойынша алынған температуралардың мәндері 2-кестеде көрсетілген.

Уақыт	1 DT	2 DT	3 DT	4 DT	5 DT	6 DT	7 DT	8 DT	9 DT	10 DT	11 DT
0 минут	25,0	25,0	25,0	25,0	25,0	25,0	25,0	25,0	25,0	25,0	25,0
5 минут	44,0	40,5	41,5	42,5	-17,0	-18,5	23,5	25,0	25,0	25,5	28,0
10 минут	48,0	39,0	40,0	41,0	-20,0	-21,0	-13,0	20,5	21,5	26,5	32,0
15 минут	54,5	40,0	40,5	42,0	-19,5	-20,0	-15,0	3,5	13,0	26,0	36,5
20 минут	59,0	40,5	41,0	42,5	-19,5	-20,5	-15,5	-5,0	4,5	24,5	40,5
25 минут	62,5	40,5	41,0	42,0	-20,0	-20,5	-16,5	-10,5	-1,5	23,0	43,5
30 минут	66,0	40,5	41,0	42,5	-20,0	-20,5	-17,5	-16,0	-6,0	22,0	46,5
35 минут	68,5	40,5	41,0	42,0	-20,5	-21,0	-18,5	-18,5	-11,0	22,0	49,0
38 минут	53,5	39,5	39,5	40,5	-20,5	-20,0	-17,0	-17,0	-12,5	28,5	50,0

2-кесте. Оңтайлы режим кезіндегі температураның мәндері, °С

Жүйенің стационар режимге шығу процесі бірқалыпты, ешбір ауытқу мен секірулерінсіз өтті. Стационар режимге шығу уақыты 38 минутты құрады. Алынған эксперименттік мәліметтердің нәтижесі бойынша жүйенің жұмыс істеу ұзақтылығы температураның тәуелділігіне график құрылды (3-сурет). Графиктен көріп отырғаныңыздай, тоңазытқыш қондырғысы іске қосылған кезде конденсация температурасы белгілі бір деңгейге дейін артады және тұрақты мәнге айналады. Тоңазытқыш агентінің қайнау температурасы жүйенің жұмысының бірінші минуттарында белгілі бір тұрақты мәнге дейін күрт төмендейді, ол орнатылған режимге сәйкес келеді. Мұздатқыш бөлігіндегі температура белгілі бір деңгейге дейін біркелкі төмендеді.



 Конденсатор
 Буландырғыш
 Мұздатқыш камерасы
 З-сурет. Оңтайлы режим кезінде температураның уақытқа тәуелділігі

Эксперимент сонымен қатар 5 минут аралық периодты түрде Guide EaslR-9 Thermal Camera маркалы жылу жүргізгішпен (тепловизор) параллель конденсатордың жылу түсірілімі жүргізілді. Нәтижесі 4-суретте көрсетілген.



4-сурет. Оңтайлы режим

Конденсаторда бітелудің болуы, капиллярлық түтіктің қатуы, фильтрдің толық бітелуі кезіндегі тән нүктелердегі температураның эксперименттік мәндері 3-кестеде көрсетілген.

Эксперименттік мәліметтерді өндеу нәтижесінде жүйенің жұмыс істеу ұзақтылығының температураға тәуелділігінің графигі құрылды (5-сурет).

Графикті сараптау нәтижесінде конденсаторда бітелудің болуы, капиллярлық түтіктің қатуы, фильтрдің толық бітелуі кезіндегі қайнау температурасы мен мұздату камерасының температурасы тоңазытқыш жүйесін қосқаннан кейін өзгермегенін аңғартты.

Уақыт, мин	1 DT	2 DT	3 DT	4 DT	5 DT	6 DT	7 DT	8 DT	9 DT	10 DT	11 DT
0	25,0	29,5	30,5	25,0	25,5	25,5	25,5	25,5	25,5	24,5	25,5
5	33,5	32,5	31,5	23,5	25,5	25,5	25,5	25,5	25,5	24,0	26,0
10	29,5	29,5	29,5	24,0	25,5	25,5	25,5	25,5	25,5	25,0	26,5
15	28,5	28,5	28,5	24,5	25,5	25,5	25,5	25,5	26,5	28,0	26,0
20	28,5	27,5	27,0	25,0	25,5	25,5	25,5	25,5	25,5	28,0	30,0
25	30,5	27,0	26,5	25,0	25,5	25,5	25,5	25,5	25,5	30,0	32,0
30	32,0	27,0	26,5	25,5	25,5	25,5	25,5	25,5	25,5	31,0	34,0
35	33,0	26,5	26,5	25,5	25,5	25,5	25,5	25,5	25,5	32,5	35,5
40	34,0	26,5	26,5	25,5	25,5	25,5	25,5	25,5	25,5	33,5	37,0
45	35,5	26,5	26,5	25,5	25,5	25,5	25,5	25,5	25,5	34,5	38,5
50	36,5	26,5	26,5	25,5	25,5	25,5	25,5	25,5	25,5	35,5	40,5
55	37,5	26,5	26,5	25,5	25,5	25,5	25,5	25,5	25,5	36,5	41,5
60	38,0	26,5	26,5	26,0	25,5	25,5	25,5	25,5	25,5	37,5	42,5
65	39,0	26,5	27,0	26,0	25,5	25,5	25,5	25,5	25,5	38,0	43,5
70	39,5	26,5	27,0	26,0	25,5	25,5	25,5	25,5	25,5	38,5	44,5
75	40,0	26,5	27,0	26,0	25,5	25,5	25,5	25,5	25,5	39,0	45,5
80	40,5	26,5	27,5	26,0	25,5	25,5	25,5	25,5	25,5	39,5	46,5
85	41,5	26,0	27,5	26,0	25,5	25,5	25,5	25,5	25,5	40,0	47,0
90	41,5	26,0	27,5	26,0	25,5	25,5	25,5	25,5	25,5	40,5	47,5

3-кесте. Конденсаторда бітелудің болуы, капиллярлық түтіктің қатуы, фильтрдің толық бітелуі кезіндегі температуралардың мәндері, °С



ОКонденсатор С Буландырғыш О Мұздатқыш камерасы 5-сурет. Конденсаторда бітелудің болуы, капиллярлық түтіктің қатуы, фильтрдің толық бітелуі кезінде уақыт бойынша температураның тәуелділігі

Бұл буландырғышқа фреонның жетпегенін көрсетеді, ал компрессор қалған тоңазытқыш агентті конденсаторға айдайды, яғни буландырғышта вакуум тудырады. Мұндай режимде жүйенің ұзақ уақыт жұмыс істеуі компрессордың бұзылуына және электр энергиясын тұтынудың жоғарылауына әкелуі мүмкін.

Жылу түсірілімнің нәтижелері 6-суретте көрсетілген.

Атап кететін жайт, конденсатордың бітелу жұмыс режимі кезінде эксперимент 1,5 сағат уақытқа созылды. Сол мезетте бұл режим стационар режимге шыққан жоқ, яғни барлық жүйе толық 90 минут бойы үздіксіз жұмыс істеп шықты. Тоңазытқыш қондырғының тоқтаусыз 1,5 сағат жұмыс істеуі электр энергияны тұтынуды көбейтеді, компрессордың тозуына және эффективтілікті жоғалтуға әкеледі.



6-сурет. Конденсаторда бітелудің болуы, капиллярлық түтіктің қатуы, фильтрдің толық бітелуі

Конденсатордың жеткіліксіз өнімділігі кезінде жүйенің тән нүктелеріндегі температуралардың мәні 4-кестеде көрсетілген.

Эксперименттік мәліметтерді сараптау нәтижесінде жүйенің жұмыс істеу ұзақтылығы мен температураның тәуелділігіне график тұрғызылды, оның бейнесін 7-суреттен көруге болады.

Бұл жұмыс режимі кезінде алынған мәліметтердің сараптамасы оңтайлы режиммен салыстырғанда мынадай қорытындыға келді:

 жұмыс режимі 80 минутқа созылды, ол 2 есе ұзақ;

– буландырғыштағы температура әлде қайда төмен, оны былай түсіндіруге болады, тоңазытқыш қондырғыны өшіру есептегіші тоңазытқыш бөлігінде орналасқандықтан, өшіру үшін қажетті температуралық деңгейге жетпегендіктен өшпеуімен түсіндіруге болады. Сондықтан, мұздатқыш бөлігіндегі буландырғыштағы қайнау температурасы оңтайлы режиммен салыстырғанда 2 есе төмен;

Уақыт	1 DT	2 DT	3 DT	4 DT	5 DT	6 DT	7 DT	8 DT	9 DT	10 DT	11 DT
0 минут	17,0	17,0	17,0	17,0	17,0	17,0	17,0	17,0	17,0	17,0	17,0
5 минут	34,0	30,0	22,0	33,5	-29,5	-31,0	16,5	13,5	12,5	19,5	26,0
10 минут	36,0	28,5	20,5	30,5	-32,5	-34,5	17,5	14,5	14,0	21,0	28,5
15 минут	38,0	27,0	19,5	29,0	-34,0	-35,5	17,0	15,0	14,5	22,5	30,5
20 минут	40,5	26,5	19,0	28,0	-35,5	-36,5	16,5	14,5	15,0	24,0	33,5
25 минут	42,5	26,0	19,0	27,5	-36,0	-37,5	16,0	14,0	14,5	25,0	35,5
30 минут	44,0	25,5	18,5	27,0	-36,5	-37,5	15,5	13,5	14,0	26,0	37,0
35 минут	46,0	25,0	18,5	26,5	-37,0	-38,0	14,5	12,5	13,5	27,0	39,0
40 минут	47,5	25,0	18,5	26,0	-37,5	-38,0	14,0	12,0	13,0	28,0	40,5
45 минут	49,5	25,0	18,5	26,0	-37,5	-38,5	13,5	11,0	12,0	28,5	42,5
50 минут	51,0	24,5	18,5	26,0	-37,5	-38,5	13,0	10,5	11,5	29,0	43,5
55 минут	52,0	24,5	18,5	26,0	-38,0	-38,5	12,5	10,0	11,0	29,5	44,5
60 минут	53,0	24,5	18,5	25,5	-38,0	-38,5	12,0	9,5	10,5	30,0	46,0
65 минут	54,0	24,5	18,5	25,5	-38,0	-38,5	12,0	9,0	10,0	30,5	46,5
70 минут	55,0	24,5	18,5	25,5	-38,0	-38,5	11,5	8,5	9,5	30,5	47,0
75 минут	56,0	24,5	18,5	25,5	-38,0	-39,0	11,0	8,0	9,0	31,5	48,0
80 минут	56,5	24,5	18,5	25,5	-38,0	-39,0	10,5	7,5	8,5	31,5	49,0

4-кесте. Конденсатордың жеткіліксіз өнімділігі кезіндегі температуралардың мәндері, °С

 – ұзақ уақыт жұмыс істеу нәтижесінде мұздатқыш камераның температурасы оңтайлы режиммен салыстырғанда 10 °С төмендеді, бірақ бұл мезетте тоңазытқыш бөлігінде қажетті температура құралмайды.



7-сурет. Конденсатордың жеткіліксіз өнімділігі кезінде уақыттың температураға тәуелділігі

Жылу түсірілімнің нәтижесінің бейнесі 8-суретте көрсетілген.



8-сурет. Конденсатордың жеткіліксіз өнімділігі

Оңтайлы режим кезінде конденсатордың жылу түсірілімінің суретін сараптау нәтижесінде орташа қиманың температурасы 43 °С, ал шығарда 39 °С құраған болатын.

Екінші жұмыс режимі кезінде конденсатордағы температурасы қосылғаннан соңына дейін бір температураны, яғни 26 °С құрады, ол дегеніміз жүйе бойынша салқындатқыштың циркуляцияланбайтынымен түсіндіріледі.

Конденсатордың жеткіліксіз өнімділігі кезінде жылу түсірілімнің суретінде конденсатордың жұмысшы денесі мен бітеулі бөлігі айқын көрінеді. Сол себепті буландырғышқа түсетін сұйықтың мөлшері төмендейді, ол тоңазытқыш камераның баяу салқындауына әкеледі.

Зерттеулердің жүргізілуі нәтижесінде, алынған барлық мәліметтерді өндеу мен сараптау арқылы келесідегідей қорытындыларды келтіруге болады:  жылуалмасу жүйесінде кез келген ақаулық бірінші кезекте жұмыс істеу уақытының ұзаруына әкеп соқтырады, ол автоматты түрде компрессордың тозуына және электр энергияның артық шығындалуына әкеледі;

 буландырғыштың жүйесіне тоңазытқыш агенттің жетпеуі компрессордың үздіксіз жұмыс істеуі кезінде салқындатылатын көлемде берілген температураның деңгейін құру және ұстап тұруға мүмкіндік бермейді, нәтижесінде қондырғының істен шығуына және электр энергияның артық шығындалуына әкеп соқтырады;

 тоңазытқыштың екі камералы жағдайында конденсатордың өнімділігінің төмендеуі тоңазытқыш бөлігінде қажетті температураны ұстап тұру мүмкіндігі болмайды, сол себепті компрессордың үздіксіз жұмыс істеуіне қажет етеді, ол электр энергияның артық шығындалуына және қондырғының тозуына әкеледі.

## Әдебиет

- Абзалов Альберт Вайсович, Идентификация предаварийных ситуаций на аммиачной холодильной установке на основе экспертной информации: автореф. дис. к.т.н: Системный анализ, управление и обработка информации (по отраслям). Астрахань, 2008. – 140 с.
- Устройство и принцип работы холодильной установки // crio.pro URL: http://crio.pro/xolodilnoe-oborudovanie/ ustrojstvo-i-princip-raboty-xolodilnoj-ustanovki / (дата обращения: 10.11.2018).
- Абзалов А.В., Жедунов Р.Р. Методика анализа предаварийных ситуаций на технологических объектах управления // Прикаспийский журнал: управление и высокие температуры №4 (24) 2013. Управление в технических системах.
- Копейковский, В.М., Данильчук С.И., Тарбузова Г.И. Технология производства растительных масел / М.: Легкая и пищевая промышленность. – 1982. – 416 с.
- Chemezov Denis, Tyurina Svetlana, Bayakina Anzhelika, Lukyanova Tatyana. Multi-factor experiment to determining of vibrations of steel pipes induced by vortex of air flow // Theoretical and Applied Science. – 2018. – 03. – P. 201–209.

#### REFERENCES

- Abzalov Al'bert Vaysovich, Identifikatsiya predavariynykh situatsiy na ammiachnoy kholodil'noy ustanovke na osnove ekspertnoy informatsii: avtoref. dis. k.t.n: Sistemnyy analiz, upravlenie i obrabotka informatsii (po otraslyam). Astrakhan', 2008. – 140 p.
- Ustroystvo i printsip raboty kholodil'noy ustanovki // crio.pro URL: http://crio.pro/xolodilnoe-oborudovanie/ ustrojstvo-i-princip-raboty-xolodilnoj-ustanovki / (data obrashcheniya: 10.11.2018).
- Abzalov A.V., Zhedunov R.R. Metodika analiza predavariynykh situatsiy na tekhnologicheskikh ob"ektakh upravleniya // Prikaspiyskiy zhurnal: upravlenie i vysokie temperatury No. 4 (24) 2013. Upravlenie v tekhnicheskikh sistemakh.

- Kopeykovskiy, V.M., Danil'chuk S.I., Tarbuzova G.I. Tekhnologiya proizvodstva rastitel'nykh masel / Moscow: Legkaya i pishchevaya promyshlennost'. – 1982. – 416 p.
- Chemezov Denis, Tyurina Svetlana, Bayakina Anzhelika, Lukyanova Tatyana. Multi-factor experiment to determining of vibrations of steel pipes induced by vortex of air flow // Theoretical and Applied Science. – 2018. – 03. – P. 201–209.

## ПРИНЦИП РАБОТЫ ХОЛОДИЛЬНИКА В СЛУЧАЕ НЕИСПРАВНОСТИ

## <u>Д.Н. Нургалиев</u>, М.В. Ермоленко, О.А. Степанова, А.Е. Сатыбалдинова

#### НАО «Университет имени Шакарима города Семей», Семей, Казахстан

В настоящее время использование искусственного холода является одним из основных факторов экономической, экологической и социальной жизни мира. Любая современная наука, техника и технологии не могут быть обеспечены без искусственного холода. А искусственный холод реализуется с помощью холодильных установок. В статье рассматриваются принципы работы холодильной установки в оптимальном режиме работы и при неисправности теплообменника. Сравнивались оптимальные режимы работы различных неисправностей и приводились выводы. Все исследования проводились экспериментально, а также были подтверждены тепловизором. Подробная информация приведена в виде таблиц и диаграмм. В результате анализа данных установлено использование метода многофакторного эксперимента. Были сделаны индивидуальные и обобщенные выводы о процессах охлаждения в каждом неисправном состоянии.

**Ключевые слова:** холодильная установка, неисправность, многофакторный эксперимент, стационар режим, температура, хладагент.

## THE PRINCIPLE OF OPERATION OF THE REFRIGERATOR IN CASE OF MALFUNCTION

## D.N. Nurgaliyev, M.V. Yermolenko, O.A. Stepanova, A.Ye. Satybaldinova

## "Semey University named after Shakarim" NP JSC, Semey, Kazakhstan

Currently, the use of artificial cold is one of the main factors of economic, environmental and social life of the world. Any modern science, technology and technology cannot provide without artificial cold. And artificial cold is implemented with the help of refrigeration units. The article discusses the principles of operation of the refrigeration unit in the optimal mode of operation and in case of a malfunction of the heat exchanger. Various problems were compared with the optimal mode of operation and conclusions were given. All research work was carried out experimentally, as well as proved by a thermal imager (thermal imager). Detailed data were presented in the form of tables and diagrams. As a result of the analysis of the data, the use of a multi-factor experimental method was revealed. Individual and generalized conclusions were made on the processes of the refrigerator in each case of a malfunction.

Keywords: refrigeration unit, malfunction, multifactorial experiment, stationary mode, temperature, refrigerant.

## <u>https://doi.org/10.52676/1729-7885-2023-1-55-60</u> УДК 504.064:631.4:539.16

# ОЦЕНКА ДОЗОВЫХ НАГРУЗОК ДЛЯ РАЗЛИЧНЫХ ПОВЕДЕНЧЕСКИХ СЦЕНАРИЕВ НА ТЕРРИТОРИИ «АТОМНОГО ОЗЕРА»

## <u>С.Б. Субботин<sup>1</sup></u>, А.О. Айдарханов<sup>1</sup>, Е.В. Романенко<sup>1</sup>, А.В. Топорова<sup>1</sup>, В.И. Супрунов<sup>1</sup>, М.Р. Актаев<sup>1,2</sup>

<sup>1)</sup> Филиал «Институт радиационной безопасности и экологии» РГП НЯЦ РК, Курчатов, Казахстан <sup>2)</sup> Евразийский национальный университет им. Л.Н. Гумилева, Астана, Казахстан

E-mail для контактов: suprunov@nnc.kz

«Атомное озеро» является одним из посещаемых туристами на СИП объектов. В связи с этим актуален расчет дозы облучения, получаемой человеком на «Атомном озере» в условиях повышенного радиационного фона. Выделены поведенческие сценарии, характерные при посещении территории «Атомного озера»: «Турист», «Персонал», «Фермер».

В используемой методике эффективная доза представлена в виде суммы парциальных доз от внешнего гаммаизлучения от почвы, ингаляционного поступления радионуклидов, перорального поступления радионуклидов с пищей. При расчетах доз облучения использованы исходные данные, полученные филиалом «Институт радиационной безопасности и экологии» РГП НЯЦ Республики Казахстан.

По итогам расчетов эффективной дозы установлено, что при выездах персонала и туристов на «Атомное озеро» превышения годовой эффективной дозы не ожидается и основным источником облучения является внешнее облучение от радионуклида <sup>137</sup>Cs. Постоянное проживание населения на данной территории исключено, поскольку приводит к превышению установленной гигиеническими нормативами годовой эффективной дозы облучения населения.

**Ключевые слова:** «Атомное озеро», радиоактивное загрязнение, сценарии поведения, турист, персонал, фермер, внешнее облучение, внутреннее облучение, расчеты доз.

## Введение

Семипалатинский испытательный полигон (СИП), закрытый в 1991 году, стал объектом для изучения воздействия радиоактивности на окружающую Вследствие его большой территории среду. (18,5 тыс. км<sup>2</sup>), вопрос о возможности использования его территории в хозяйственной деятельности при условии обеспечения радиационной безопасности является экономически важным. Исследования СИП показали, что часть земель полигона удовлетворяет требованиям гигиенических нормативов (ГН) [1] и, вследствие этого пригодна для хозяйственного использования [2, 3]. Данное исследование отвечает на вопрос о возможности посещения и пригодности для хозяйственных целей другого участка СИП, а именно, территории вокруг «Атомного озера».

В 1965 году в СССР в рамках Государственной программы № 7 «Ядерные взрывы для народного хозяйства» было проведено экскавационное ядерное испытание с целью оценки возможности создания искусственных водохранилищ в засушливых районах, в результате чего появилось «Атомное озеро» (рисунок 1) [4].

Экскавационным ядерным взрывом создана водная система из двух водных объектов: внешнего водохранилища (озеро перед навалом воронки) и внутреннего водохранилища (кратера). Испытание заряда привело к радиоактивному загрязнению значительной территории (более 10 км<sup>2</sup>) в северном от озера направлении [5] (рисунок 2).



Рисунок 1. «Атомное озеро», внутреннее водохранилище (кратер). Общий вид с вертолета по азимуту 60°

Оценка радиационного риска пребывания на «Атомном озере» выполнена для трёх поведенческих сценариев.

Сценарий «Турист» используется для туриста, приехавшего один раз в год на один час на экскурсию на «Атомное озеро». Турист – взрослый человек, использующий средство защиты органов дыхания (Лепесток-200), который в течение экскурсии не употребляет пищу или напитки, не курит. Средняя интенсивность дыхания для взрослых при легкой физической нагрузке составляет 0,9 м<sup>3</sup>/ч [6].



Рисунок 2. Карта обследования уровня радиоактивного загрязнения <sup>137</sup>Cs территории, прилегающей к «Атомному озеру»

Сценарий «Персонал» используется для персонала, занятого исследованиями на данной территории. Радиоэкологические исследования территории заключаются в проведении измерений и отборе проб, для проведения которых в большинстве случаев достаточно одной рабочей смены. Длительность рабочей смены – 7,12 часа. Для защиты органов дыхания персонал использует респиратор типа «Лепесток-200», употребляет пищу и воду в передвижном жилом лагере, находящемся за пределами загрязненной территории. При тяжелой работе интенсивность дыхания составляет 2,8 м<sup>3</sup>/ч [6].

В сценарии «Фермер» предполагается, что взрослый человек живет и ведет хозяйственную деятельность на территории «Атомного озера». Предполагается, что фермер часть времени (8 часов) проводит на открытом воздухе, все остальное время он проводит в доме. Коэффициент экранирования (стены дома) принят равным 0,4. Интенсивность дыхания при нахождении на открытом воздухе принимается равной 1,8 м<sup>3</sup>/ч, в помещении 0,9 м<sup>3</sup>/ч [6].

#### МЕТОДИКА РАСЧЕТА ДОЗ ОБЛУЧЕНИЯ

В расчете доз облучения предполагается, что вся деятельность осуществляется на территории максимального загрязнения. Учитывая размеры загрязненной области (более 10 км<sup>2</sup>), это является возможным [5]. В сценариях рассматривается доза внешнего гамма-облучения; доза внутреннего облучения от ингаляционного поступления радионуклидов; доза внутреннего облучения от перорального поступления радионуклидов с пищей и водой.

Ожидаемая годовая эффективная доза  $E_{ef}$  выражена в виде суммы парциальных доз по всем *j*-ым факторам радиационного воздействия:

$$E_{ef} = E_{\gamma} + E_{inh} + E_{mg},$$

где  $E_{\gamma}$  – доза внешнего облучения гамма-излучением;  $E_{inh}$  – доза внутреннего облучения от ингаляционного поступления радионуклидов;  $E_{mg}$  – доза внутреннего облучения от перорального поступления радионуклидов с пищей.

Алгоритм расчета заключается в оценке годовой эффективной дозы от каждого возможного пути облучения согласно выбранному сценарию поведения человека на загрязненной территории.

Эффективная доза (в мЗв) от внешнего гамма-излучения ( $E_{\gamma}$ ) определяется как:

$$E_{\gamma} = \sum E_{\gamma i} ,$$
  
$$E_{\gamma i} = A_{si} \cdot B_{sgi} \cdot T \cdot K_{tc}$$

где  $E_{\gamma i}$  – эффективная доза внешнего гамма-излучения для *i*-го радионуклида, Зв/год; *T* – время облучения, ч/год;  $B_{sgi}$  – коэффициент перехода от единичной поверхностной активности радионуклида в почве к мощности поглощенной дозы гамма-излучения в воздухе на высоте 1 м над поверхностью земли, мГр·м<sup>2</sup>/ч·кБк [7];  $K_{tc}$  – коэффициент перехода от дозы в воздухе на высоте 1 м над подстилающей поверхностью к эффективной дозе для представителей *j*-ой группы населения мЗв/мГр (принимается равным 0,75 мЗв/мГр – для взрослого населения) [7];  $A_{si}$  – площадная активность *i*-го радионуклида, кБк/м<sup>2</sup>:

$$A_{si} = A_{mi} \cdot \rho \cdot h \cdot 10^{-3},$$

где  $A_{mi}$ — удельная активность *i*-го радионуклида в поверхностном слое почвы, Бк/кг;  $\rho$  – плотность почвенного покрова,  $1,3 \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup>; h – глубина поверхностного слоя почвы, 0-5 см.

Ожидаемая годовая эффективная доза от поступления искусственных радионуклидов ингаляционным путем (через органы дыхания) ( $E_{inh}$ ) определяется по формуле:

$$E_{inh} = \sum E_{inhi} \; ,$$
  
 $E_{inhi} = V \cdot e_{inhi} \cdot A_{v} \cdot T \; ,$ 

где V – интенсивность дыхания представителей *j*-ой группы населения,  $M^{3/4}$ ;  $e_{inhi}$  – дозовый коэффициент для *i*-го радионуклида при его поступлении ингаляционным путем, Зв/Бк [7]; *T* – время облучения, ч/год;  $A_v$  – объемная активность *i*-го радионуклида в воздухе, Бк/м<sup>3</sup>.

При использовании средств индивидуальной защиты органов дыхания (СИЗОД) «Лепесток -200» коэффициент эффективности средств защиты органов дыхания позволяет достигнуть эффективности ослабления от 0,5 до 0,125. При проведении расчетной оценки принимаем коэффициент защиты 0,125.

Эффективная доза от поступления радионуклидов с пищей ( $E_{mg}$ ) определяется по формуле:

$$E_{mg} = \sum E_{mgi}$$
$$E_{mgi} = A_{mi} \cdot q \cdot e_{dii},$$

где  $A_{mi}$  – удельная активность *i*-го радионуклида в продуктах питания, Бк/кг; *q* – годовое потребление продукта питания, кг/год [9]; *e*<sub>dti</sub> – дозовый коэффициент для *j*-ой группы населения *i*-го радионуклида при поступлении его с пищей, Зв/Бк [7].

Периодические наблюдения за радиационным состоянием экосистемы «Атомного озера» начались сразу после проведения испытания в 1965 г. К настоящему моменту по «Атомному озеру» накоплен огромный массив данных по радиационному состоянию объектов окружающей среды [5, 10, 11].

Определено, что в образцах объектов окружающей среды на территории «Атомного озера» содержатся следующие искусственные радионуклиды: <sup>90</sup>Sr, <sup>137</sup>Cs, <sup>239+240</sup>Pu, <sup>241</sup>Am, <sup>3</sup>H [5]. Для сохранения консервативности в расчетах использованы максимальные значения (таблица 1).

Таблица 1. Максимальные значения активности радионуклидов

Объект	<sup>137</sup> Cs	90Sr	<sup>239+240</sup> Pu	<sup>241</sup> Am	³Н
Почва, (кБк/кг)	14	0,92	17	3	-
Воздух, (Бк/м <sup>3</sup> )	9,5·10 <sup>-7</sup>	0,003	4,8.10-4	5,0·10-7	90
Вода, (Бк/л)	0,07	2	0,0003	2	1,8·10 <sup>4</sup>
Рыба (мышечная ткань), (Бк/кг)	1,66	4,9	0,25	0,4	30

Значения параметров, используемых при проведении оценки доз облучения от рассматриваемых путей облучения искусственными радионуклидами, приведены в таблице 2.

Таблица 2. Значения коэффициентов для оценки доз облучения

Коэффициент	<sup>137</sup> Cs	90Sr	<sup>239+240</sup> Pu	<sup>241</sup> Am	³Н
<i>В<sub>sg</sub></i> , мГр∙м²/ч∙кБк	2,5.10-6	1,0·10 <sup>-9</sup>	1,3·10-9	9,7·10 <sup>-8</sup>	-
e <sub>dt</sub> , Зв/Бк	1,3.10-8	2,8.10-8	2,5.10-7	2,0.10-7	4,2.10-11
е <sub>іпһнас</sub> , Зв/Бк	4,6.10-9	5,0·10 <sup>-8</sup>	5,0·10 <sup>-5</sup>	4,2·10 <sup>-5</sup>	2,7.10-10
е <sub>іпһперс</sub> , Зв/Бк	4,8·10-9	1,5·10 <sup>-7</sup>	4,7.10-5	3,9.10-5	1,8·10 <sup>-11</sup>

#### Результаты и обсуждение

С использованием методики расчета доз облучения, приведенной выше, получены дозы облучения для всех сценариев (таблица 3). Ожидаемая эффективная доза по сценарию «Турист» за одно посещение территории «Атомного озера» составит 1,9·10<sup>-3</sup> мЗв, по сценарию «Персонал» за рабочую

смену – 1,4·10<sup>-2</sup> мЗв. Ожидаемая годовая эффективная доза по сценарию «Фермер» – 11,7 мЗв/год. В соответствии с гигиеническими требованиями [1] проживание населения на исследуемой территории по сценарию «Фермер» исключено, поскольку приводит к превышению допустимой годовой эффективной дозы населения более, чем в 11 раз. В то же время, при выполнении условий сценариев «Турист» и «Персонал» разовое посещение «Атомного озера» по ГН [1] допустимо.

Источник облучения	Турист (разовое посещение)	Персонал (рабочая смена)	Фермер (календарный год)
Внешнее гамма-облучение	1,9·10-3	1,4·10-2	10,2
Ингаляционное поступле- ние радионуклидов	5,5·10 <sup>-6</sup>	6,1·10-5	5,1·10 <sup>-1</sup>
Пероральное поступление радионуклидов	-	-	1
Суммарная доза	1,9·10⁻₃	1,4·10-2	11,7

Таблица 3. Расчетные эффективные дозы облучения, мЗв

Рассмотрен вклад искусственных радионуклидов в суммарную эффективную дозу облучения (таблица 4). Из результатов расчетов видно, что по всем сценариям наибольший вклад вносит радионуклид <sup>137</sup>Cs. Вторым по значимости радионуклидом является <sup>241</sup>Am. В течение ближайших шестидесяти лет облучение от радионуклида <sup>137</sup>Cs будет осложнять радиационную обстановку больше, чем остальные факторы. На временном участке более ста лет загрязнение радионуклидом <sup>241</sup>Am является основным и исключает возможность освоения исследуемой территории.

Таблица 4. Вклад искусственных радионуклидов в ожидаемую годовую эффективную дозу облучения, мЗв

Guananuă	Радионуклид							
Сценарии	<sup>137</sup> Cs	90Sr	<sup>239+240</sup> Pu	<sup>241</sup> Am	зН			
Турист (разовое посещение)	1,7·10 <sup>-3</sup>	7,1·10 <sup>-7</sup>	1,9·10⁻⁵	2,2.10-4	2,7.10-6			
Персонал (рабочая смена)	1,2.10-2	6,0·10 <sup>-6</sup>	1,7.10-4	1,6·10 <sup>-3</sup>	4,0·10 <sup>-6</sup>			
Фермер (кален- дарный год)	9,0	0,1	3,6·10 <sup>-1</sup>	1,5	8,1.10-1			

Использование респираторов при посещении «Атомного озера» и запреты на курение, потребление еды, использование косметики, применяемые в сценариях «Турист» и «Персонал», оправданы, поскольку они позволяют значительно снизить вклады в получаемую эффективную дозу от ингаляционного поступления радионуклидов и перорального поступления радионуклидов (рисунок 3). Эти меры защиты позволяют снизить эффективную дозу облучения от радионуклидов <sup>239+240</sup>Ри и <sup>3</sup>Н (рисунок 4).

## ОЦЕНКА ДОЗОВЫХ НАГРУЗОК ДЛЯ РАЗЛИЧНЫХ ПОВЕДЕНЧЕСКИХ СЦЕНАРИЕВ НА ТЕРРИТОРИИ «АТОМНОГО ОЗЕРА»



ингаляционное поступление радионуклидов

пероральное поступление радионуклидов

#### б)

#### Рисунок 3. Вклады источников облучения в ожидаемую эффективную дозу по сценариям «Турист» и «Персонал» (a), «Фермер» (б)

В то же время, часть земель полигона пригодна для хозяйственного использования. Так, установлено, что для северной части СИП ожидаемая годовая эффективная доза для проживающего населения при условии «наихудшего» сценария не превысит 0,3 мЗв [2], а доза внутреннего облучения от изотопов плутония составит около 0,1 мЗв/год [3].

В отличие от северной части СИП, при проживании на территории вблизи «Атомного озера», имеющей радиоактивное загрязнение, ожидаемая годовая эффективная доза для населения увеличивается примерно в сорок раз, а доза внутреннего облучения от изотопов плутония увеличится более, чем в три раза.

#### Выводы

Ожидаемая эффективная доза для сценариев «Турист» и «Персонал» не превышает нормативных пределов гигиенических нормативов [1], и составляет  $1,9\cdot10^{-3}$  мЗв и  $1,4\cdot10^{-2}$  мЗв соответственно. Посещение «Атомного озера» туристами и персоналом не приводит к сверхнормативному облучению.



#### Рисунок 4. Вклады радионуклидов в сценарии «Турист» и «Персонал» (а), «Фермер» (б)

Ожидаемая годовая эффективная доза для фермера, живущего около «Атомного озера» и потребляющего рыбу и воду из него, составит 11,7 мЗв/год, что превышает установленный норматив – 1 мЗв/год для населения [1] более чем в одиннадцать раз. Территория вблизи «Атомного озера» не рекомендуется для проживания людей, относящихся к категории население.

Во всех сценариях основной вклад в эффективную дозу, получаемую при посещении «Атомного озера» вносит жесткое гамма-излучение <sup>137</sup>Cs (рисунок 4). Данный радионуклид имеет значительный период полураспада (30,16 лет), в связи с чем изменение радиационной обстановки на территории, прилегающей к «Атомному озеру», в ближайшем будущем не предвидится.

На большой временной дистанции, после распада радионуклида <sup>137</sup>Cs, основной вклад начнут вносить трансурановые элементы <sup>239+240</sup>Pu и <sup>241</sup>Am, которые обладают более длительным периодом полураспада. Исходя из этого, стоит признать, что территория, прилегающая к «Атомному озеру», непригодна для проживания даже в отдаленном будущем.

Исследования выполнены в рамках проекта МНТЦ К-2160.

## Литература

- Министр здравоохранения Республики Казахстан. Об утверждении гигиенических нормативов к обеспечению радиационной безопасности: Приказ от 2 августа 2022 года № КР ДСМ-71. – https://adilet.zan.kz/rus/docs/V2200029012.
- 2. Радиоэкологическое состояние «северной» части Семипалатинского испытательного полигона: монография/ под рук. С. Н. Лукашенко. – 2-е изд.// Актуальные вопросы радиоэкологии Казахстана/ Ин-т радиационной безопасности и экологии РГП НЯЦ РК. – Павлодар: ТОО «Дом печати», 2010. – Вып. 1. – 294 с.: ил. – Библиогр.: с. 281–290;115 назв. – 500 экз. – ISBN 978-601-7112-38-7.
- 3. Брянцева, Н.В. Расчет доз от изотопов плутония по результатам исследования его содержания в моче для населения, проживающего в зоне влияния СИП / Н.В. Брянцева, А.В. Топорова, А.А. Жадыранова, С.Н. Лукашенко // Актуальные вопросы радиоэкологии Казахстана : сб.трудов / Институт радиационной безопасности и экологии РГП НЯЦ РК. – Курчатов, 2010. – Вып. 2. – С. 463–474.
- Березин, С.А.. Мирные ядерные взрывы на территории Казахстана / С.А. Березин, Д.Г. Гильманов, Ж.Р. Жотабаев [и др.] // Вестник НЯЦ РК. – 2001. – Вып. 7(3). – С. 57–62.
- Subbotin, S.B. Development of measures for limiting negative impacts of the «Atomic» lake on population and environment / S.B. Subbotin, A.O. Aidarkhanov, V.V. Romanenko [et. al.] // Journal of Environmental Radioactivity. – 2020. – Vol. 223–224. – 6 p. https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2020.106389.
- ICRP Publication 66. Human Respiratory Tract Model for Radiological Protection // Annals of the ICRP. – 1994. – 488 p. [Electronic resource] // International Commission on Radiological Protection. URL: https://www.icrp.org/ publication.asp?id=icrp%20publication%2066.
- Топорова, А.В. Обзор методических указаний и рекомендаций по оценке годовой эффективной дозы человека при проживании на радиоактивно загрязненной территории / А.В. Топорова, Ю.В. Бакланова, Ю.Г. Стрильчук, А.Н. Шатров // Вестник НЯЦ РК. – 2021. – Вып. 2 (86). – С. 57–69.– Библиогр.: с. 67. https://doi.org/10.52676/1729-7885-2021-2-57-69.
- Топорова, А. В. Оценка граничных параметров радиоактивного загрязнения территорий гарантирующих непревышение допустимых дозовых нагрузок / А.В. Топорова, С.Н. Лукашенко // Актуальные вопросы радиоэкологии Казахстана: филиал Институт радиационной безопасности и экологии: Вып. 5: монография. – Курчатов, 2015. – Разд. 6. – С. 293–312.
- Приказ Министра национальной экономики Республики Казахстан от 9 декабря 2016 года № 503 «Об утверждении научно обоснованных физиологических норм потребления продуктов питания».
- 10. Айдарханов, А.О. Результаты радиологического обследования территории, прилегающей к «Атомному» озеру / А.О. Айдарханов, С.Н. Лукашенко, М.А. Умаров, Ю.Ю. Яковенко // Актуальные вопросы радиоэкологии Казахстана: сб. тр. / Институт радиационной безопасности и экологии РГП НЯЦ РК. – Курчатов, 2017. – Вып. 6, Т. 1. – С. 125–143.
- Субботин, С.Б. Исследования миграции трития с подземными водами на бывшем Семипалатинском полигоне / С.Б. Субботин, А.О. Айдарханов, Ю.В. Дубасов // Радиохимия. – 2013. – Т. 55. – № 5. – С. 471–478.

#### REFERENCES

- Ministr zdravookhraneniya Respubliki Kazakhstan. Ob utverzhdenii gigienicheskikh normativov k obespecheniyu radiatsionnoy bezopasnosti: Prikaz ot 2 avgusta 2022 goda No. KR DSM-71. https://adilet.zan.kz/rus/docs/V2200029012.
- Radioekologicheskoe sostoyanie «severnoy» chasti Semipalatinskogo ispytatel'nogo poligona: monografiya/ pod ruk. S. N. Lukashenko. – 2-e izd.// Aktual'nye voprosy radioekologii Kazakhstana/ In-t radiatsionnoy bezopasnosti i ekologii RGP NYaTs RK. – Pavlodar: TOO "Dom pechati", 2010. – Issue 1. – 294 p.: il. – Bibliogr.: p. 281– 290;115 nazv. – 500 ekz. – ISBN 978-601-7112-38-7.
- Bryantseva, N.V. Raschet doz ot izotopov plutoniya po rezul'tatam issledovaniya ego soderzhaniya v moche dlya naseleniya, prozhivayushchego v zone vliyaniya SIP / N.V. Bryantseva, A.V. Toporova, A.A. Zhadyranova, S.N. Lukashenko // Aktual'nye voprosy radioekologii Kazakhstana : sb.trudov / Institut radiatsionnoy bezopasnosti i ekologii RGP NYaTs RK. – Kurchatov, 2010. – Issue 2. – P. 463–474.
- Berezin, S.A.. Mirnye yadernye vzryvy na territorii Kazakhstana / S.A. Berezin, D.G. Gil'manov, Zh.R. Zhotabaev [i dr.] // Vestnik NYaTs RK. – 2001. – Issue 7(3). – P. 57–62.
- Subbotin, S.B. Development of measures for limiting negative impacts of the «Atomic» lake on population and environment / S.B. Subbotin, A.O. Aidarkhanov, V.V. Romanenko [et. al.] // Journal of Environmental Radioactivity. – 2020. – Vol. 223–224. – 6 p. https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2020.106389.
- ICRP Publication 66. Human Respiratory Tract Model for Radiological Protection // Annals of the ICRP. – 1994. – 488 p. [Electronic resource] // International Commission on Radiological Protection. URL: https://www.icrp.org/ publication.asp?id=icrp%20publication%2066.
- Toporova, A.V. Obzor metodicheskikh ukazaniy i rekomendatsiy po otsenke godovoy effektivnoy dozy cheloveka pri prozhivanii na radioaktivno zagryaznennoy territorii / A.V. Toporova, Yu.V. Baklanova, Yu.G. Stril'chuk, A.N. Shatrov // Vestnik NYaTs RK. – 2021. – Issue 2 (86). – P. 57–69.– Bibliogr.: p. 67. https://doi.org/10.52676/1729-7885-2021-2-57-69.
- Toporova, A. V. Otsenka granichnykh parametrov radioaktivnogo zagryazneniya territoriy garantiruyushchikh neprevyshenie dopustimykh dozovykh nagruzok / A.V. Toporova, S.N. Lukashenko // Aktual'nye voprosy radioekologii Kazakhstana: filial Institut radiatsionnoy bezopasnosti i ekologii: Issue 5: monografiya. – Kurchatov, 2015. – Section 6. – P. 293–312.
- Prikaz Ministra natsional'noy ekonomiki Respubliki Kazakhstan ot 9 dekabrya 2016 goda No. 503 "Ob utverzhdenii nauchno obosnovannykh fiziologicheskikh norm potrebleniya produktov pitaniya".
- Aydarkhanov, A.O. Rezul'taty radiologicheskogo obsledovaniya territorii, prilegayushchey k «Atomnomu» ozeru / A.O. Aydarkhanov, S.N. Lukashenko, M.A. Umarov, Yu.Yu. Yakovenko // Aktual'nye voprosy radioekologii Kazakhstana: sb. tr. / Institut radiatsionnoy bezopasnosti i ekologii RGP NYaTs RK. – Kurchatov, 2017. – Issue 6, T. 1. – P. 125–143.
- Subbotin, S.B. Issledovaniya migratsii tritiya s podzemnymi vodami na byvshem Semipalatinskom poligone / S.B. Subbotin, A.O. Aydarkhanov, Yu.V. Dubasov // Radiokhimiya. – 2013. – T. 55. – No. 5. – P. 471–478.

## «АТОМ КӨЛІНІҢ» АУМАҒЫНДАҒЫ ӘРТҮРЛІ МІНЕЗ-ҚҰЛЫҚ КЕЗЕҢДЕРІ ҮШІН ДОЗАЛЫҚ ЖҮКТЕМЕЛЕРДІ БАҒАЛАУ

<u>С.Б. Субботин<sup>1</sup></u>, А.О. Айдарханов<sup>1</sup>, Е.В. Романенко<sup>1</sup>, А.В. Топорова<sup>1</sup>, В.И. Супрунов<sup>1</sup>, М.Р. Актаев<sup>1,2</sup>

<sup>1)</sup> ҚР ҰЯО РМК «Радиациялық қауіпсіздік және экология институты» филиалы, Курчатов, Қазақстан <sup>2)</sup> Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Астана, Қазақстан

«Атом көлі» – ССП туристері баратын нысандардың бірі. Осыған байланысты адамның «Атом көлінде» жоғары радиациялық фон жағдайында алатын сәулелену дозасын есептеу өзекті болып табылады. «Атом көлінің» аумағына барған кезде тән мінез-құлық сценарийлері: «Турист», «Персонал», «Фермер».

Қолданылатын Әдістемеде тиімді доза топырақтан сыртқы гамма-сәулеленуден, радионуклидтердің ингаляциялық түсуінен, тамақпен радионуклидтердің ауызша түсуінен ішінара дозалар сомасы түрінде ұсынылады. Есептеулерде Қазақстан Республикасы ҰЯО РМК «Радиациялық қауіпсіздік және экология институты» филиалының зерттеулері барысында алынған деректер пайдаланылды. Әртүрлі жағдайдағы сценарийлерде жылдық тиімді доза топырақтан сыртқы гамма-сәулеленуден, радионуклидтердің ингаляциялық түсуінен, тамақпен радионуклидтердің ауызша түсуінен парциалды дозалар сомасы түрінде ұсынылады.

Сәулелену дозаларын есептеу нәтижелері халықтың осы аумақта тұрақты тұруына тиім салынуын көрсетті, өйткені бұл халықтың жылдық тиімді сәулелену дозасының белгіленген гигиеналық нормативтен (СЭТОРБ ГН) асып кетуіне әкеледі. «А» тобының персоналы мен туристер «Атом көліне» барған кезде жылдық тиімді дозадан асып кету күтілмейді және сәулеленудің негізгі көзі <sup>137</sup>Сs радионуклидінен сыртқы сәулелену болып табылады. Сонымен қатар, зерттелетін аумақта тұру кезінде радионуклидтерді сумен қабылдау кезінде жылдық тиімді доза халықтың сәулеленуінің белгіленген жылдық тиімді дозасынан асып кетуіне әкеледі.

**Түйін сөздер:** «Атом көлі», радиоактивті ластану, сценарийлері, турист, қызметкерлер, фермер, сыртқы сәулелену, ішкі сәулелену, дозаны есептеу.

## ASSESSMENT OF DOSE LOADS FOR VARIOUS BEHAVIORAL SCENARIOS ON THE TERRITORY OF THE "ATOMIC LAKE"

S.B. Subbotin<sup>1)</sup>, A.O. Aidarkhanov<sup>1)</sup>, Ye.V. Romanenko<sup>1)</sup>, A.V. Toporova<sup>1)</sup>, V.I. Suprunov<sup>1)</sup>, M.R. Aktaev<sup>1,2)</sup>

<sup>1)</sup> RSE NNC RK Branch "Institute of Radiation Safety and Ecology", Kurchatov, Kazakhstan <sup>2)</sup> L.N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, Kazakhstan

"Atomic Lake" is one of the objects visited by tourists at Semipalatinsk test site. In this regard, the calculation of the radiation dose received by a person on "Atomic Lake" in conditions of high radiation is relevant. Behavioral scenarios typical when visiting the territory of "Atomic Lake" are highlighted: "Tourist", "Staff", "Farmer".

In the method used, the effective dose is represented as the sum of partial doses from external gamma radiation from the soil, inhalation intake of radionuclides, oral intake of radionuclides with food. The calculations used data obtained by the branch of RSE National Research Center of the Republic of Kazakhstan "Institute of Radiation Safety and Ecology". In behavioral scenarios, the annual effective dose is represented as the sum of partial doses from external gamma radiation from the soil, inhalation intake of radionuclides, oral intake of radionuclides from food.

The results of the calculation of radiation doses showed that permanent residence of the population in this territory is excluded, since it leads to exceeding the annual effective radiation dose of the population established by the hygienic standard (GN SETORB). No excess of the annual effective dose is expected when Group A personnel and tourists visit the "Atomic Lake", and the main source of exposure is external radiation from radionuclide <sup>137</sup>Cs. At the same time, when living in the study area, the annual effective dose with oral intake of radionuclides with water leads to an excess of the established annual effective radiation.

**Keywords:** "Atomic Lake", radioactive contamination, behavior scenarios, tourist, staff, farmer, external exposure, internal exposure, dose calculations.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ВНЕДРЕНИЯ НОВОЙ ТЕХНОЛОГИИ ОЦИФРОВКИ ИСТОРИЧЕСКИХ СЕЙСМОГРАММ В ЦЕНТРЕ ДАННЫХ

#### П.В. Рябенко, И.Н. Соколова

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

#### E-mail для контактов: ruabenko@kndc.kz

Впервые в ИГИ НЯЦ РК внедрена новая методика оцифровки, позволяющая оцифровывать аналоговые сейсмограммы с хорошим качеством, с сохранением в современных форматах сейсмологических данных. В новой методике использовано программное обеспечение WaveTrack, разработанное в Новосибирском региональном центре информационных технологий, а также ряд дополнительных программ, созданных в Мичиганском Государственном университете США. Проведено сравнение результатов оцифровки с программой NXSCAN, разработанной в IRIS, США. В результате отмечен ряд преимуществ новой методики, показано, что в определенном частотном диапазоне данные, оцифрованные разными методами, можно использовать совместно. Создана база данных оцифрованных сейсмограмм ядерных взрывов. В настоящее время оцифрованные сейсмограммы используются для различных задач сейсмического мониторинга.

**Ключевые слова:** аналоговая сейсмограмма, сканирование, оцифровка, частотная характеристика, ядерные взрывы.

#### Введение

В настоящее время во всем мире растет интерес к историческим геофизическим данным. Используя исторические сейсмограммы, можно уточнить параметры исторических событий, изучить геодинамические процессы в сейсмически активных областях Земли, глобальные изменения климата. Исторические сейсмограммы ядерных испытаний являются важнейшими источниками информации об ядерных взрывах, поствзрывных эффектах и др. Однако многие исследования и анализ данных провести невозможно, используя оригинальные аналоговые сейсмограммы. Если эти записи ядерных взрывов перевести в цифровую форму, то возможности обработки этих данных значительно расширятся. Так, имея оцифрованные записи можно проводить цифровую фильтрацию, корреляционный анализ, математическое моделирование, строить спектры Фурье и многое другое.

Работы по оцифровке исторических сейсмограмм стартовали в ИГИ НЯЦ РК в 2005 году в рамках бюджетной программы «Создание электронного архива исторических сейсмограмм ядерных взрывов и землетрясений, зарегистрированных станциями специального контроля» (2005-2011 гг.). В 2012 году начался совместный проект с LDEO по оцифровке исторических сейсмограмм из архивов Казахстана, предусматривающий и оцифровку дугообразных сейсмограмм, зарегистрированных приборами PB3T и КСЭ [1], и создание общей базы данных сейсмограмм ядерных взрывов, оцифрованных в рамках различных проектов (2012-2014 гг.). В 2018 г. ИГИ начал совместный проект с АФТАК. В рамках проекта было оцифровано порядка 2000 сейсмограмм ядерных взрывов в районе Семипалатинского испытательного полигона (СИП), зарегистрированных станциями КСЭ ИФЗ АН СССР [2].

В общей сложности за время участия в разных проектах до 2020 года сотрудниками ИГИ было оцифровано более 9000 аналоговых взрывов из района Семипалатинского испытательного полигона, зарегистрированных станциями КСЭ ИФЗ АН сейсмограмм ядерных взрывов с регистрацией на фотобумагу из архивов различных сейсмологических организаций Казахстана – СОМЭ МЧС РК, ИГИ НЯЦ РК, КСЭ ИФЗ АН СССР и Кыргызского Института сейсмологии НАН КР.

## СИСТЕМА РЕГИСТРАЦИИ И ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ МАТЕРИАЛЫ

В ходе работы над проектом для оцифровки были выбраны ранее неоцифрованные записи ПЯВ из района СИП, зарегистрированные станциями на региональных расстояниях. Сейсмограммы выбирались из архива исторических сейсмограмм Комплексной сейсмологической экспедиции (КСЭ) Объединенного Института физики Земли им. О.Ю. Шмидта АН СССР. В настоящее время архив сейсмограмм находится в КNDC ИГИ НЯЦ РК в г. Алматы.

Оцифровке подлежали записи 1961–1981 гг., в это время в составе сети КСЭ работали сейсмические станции, оснащенные оборудованием СКМ, РВЗТ и КСЭ. На первом этапе для оцифровки были выбраны сейсмограммы, зарегистрированные сейсмометром СКМ, с регистрацией на фотобумагу. Каждая сейсмическая станция была оборудована двумя горизонтальными и одним вертикальным сейсмографами для регистрации трех составляющих сейсмического сигнала. Для расширения динамического диапазона записи одна из составляющих записывалась с загрублением в 20 раз. На рисунке 1 представлена карта расположения станций и ПЯВ, данные которых использовались для оцифровки.

РЕЗУЛЬТАТЫ ВНЕДРЕНИЯ НОВОЙ ТЕХНОЛОГИИ ОЦИФРОВКИ ИСТОРИЧЕСКИХ СЕЙСМОГРАММ В ЦЕНТРЕ ДАННЫХ



Рисунок 1. Карта расположения сейсмических станций и ПЯВ, данные которых использовались для оцифровки

## Технологии оцифровки

В период с 2005 по 2020 гг. для оцифровки использовалась программа NXSCAN [3], разработанная в IRIS. Эта программа работала под управлением операционной системы SUN OS Solaris и была разработана 30 лет назад. В процессе оцифровки использовался сканер SCAN PLUS III с максимальным разрешением сканирования 400 dpi. Сканирование сейсмограммы проводилось в черно-белом режиме и с инверсией цветов.

Программное обеспечение NXSCAN использовало алгоритм автоматической прорисовки линий с использованием опорных точек. Оцифровка сейсмического события проводилось в несколько этапов, так как ПО NXSCAN не позволяло расстановку лимитированного количества точек. Впоследствии оцифрованные отрезки склеивались с помощью скриптов. Результат оцифрованной записи сохранялся в формате SAC [4] и в дальнейшем его конвертировали в CSS 3.0 [5].

В результате использования этого метода часть информации терялась во время процесса сканирования в черно-белом режиме, что приводило к снижению качества оцифровки. Кроме того, возникали сложности с оцифровкой высокочастотных записей, характерных для сейсмограмм взрывов на близких расстояниях. Нужно отметить также, что программа NXSCAN работает под управлением операционной системы Solaris на рабочих станциях SUN и использует старые графические библиотеки. К тому же в настоящее время эти рабочие станции уже не производятся. Начиная с августа 2020 г. стартовал проект ИГИ совместно с Мичиганским Государственным университетом США (MSU). В целях улучшения качества оцифрованного материала, было принято решение использовать другой сканер и другое программное обеспечение, которое позволяет использовать сейсмические записи, отсканированные с разрешением 1200 dpi в режиме оттенков серого цвета.

В рамках проекта с AFTAC был закуплен новый сканер Contex HD Ultra X 4290 ScanStation с максимальным разрешением сканирования 1200 dpi. Это позволило использовать изображения с более четкой детализацией. В качестве программы оцифровки была выбрана WaveTrack, разработанная в Институте нефтегазовой геологии и геофизики им. Трофимука А.А. СО РАН. Эта программа широко используется для оцифровки аналоговых сейсмограмм ядерных взрывов в Мичиганском Государственном университете, ГС РАН и других организациях. Данное программное обеспечение имеет ряд преимуществ по сравнению с программой NXSCAN. Оно позволяет производить коррекцию нелинейных временных шкал, которые распространены на аналоговых сейсмограммах; может быть использовано для трассировки самых сложных волновых форм и написано для операционной системы Windows.

Целью использования новой технологии оцифровки было достижение высокого качества оцифрованных сейсмограмм. Помимо использования высокого разрешения сканера и нового ПО в технологию были включены новые методы подготовки сейсмограммы и проведение контроля качества на всех этапах оцифровки. Методика оцифровки была разработана и предложена для реализации настоящего проекта сотрудниками MSU (К. Маки, Д. Бёрк, К. Буркхард и др.). Ниже изложены основные этапы процесса оцифровки.

1. На первом этапе происходит подготовка и сканирование сейсмограммы. Сканирование выполняется на широкоформатном сканере Contex HD Ultra X 4290. Формат файла BMP, разрешение 600 dpi.

2. Для корректной оцифровки необходимо произвести выравнивание образа сейсмограммы, если она была отсканирована под небольшим углом. Для этого используется бесплатный программный комплекс обработки растровых изображений IrfanView [4]. С помощью встроеных плагинов производится поворот сейсмограммы по или против часовой стрелки. Для каждой сейсмограммы оцифровщик находит угол поворота  $\alpha$  по формуле  $\alpha = \arctan(\Delta Y/\Delta X)$ .

3. Для уменьшения количества оцифрованных фрагментов, а следовательно, в конечном итоге для улучшения качества, желательно провести совмещение по времени 2-х последовательных дорожек сейсмограммы. Это необходимо для того, чтобы оцифровщик выполнил работу за 1 проход. Совмещение и склейка записи происходит в программе Adobe Photoshop или других аналогичных программах обработки изображения.

4. После того, как этап подготовки сейсмограммы закончен, необходимо приступить к оцифровке. Для этого используется программа WaveTrack. Необходимо сначала выставить масштабирующий шаблон-рамку на временные метки для временной привязки и использования развертки сейсмограммы. Для оцифровки сейсмограмм с разверткой 120 мм/мин используется заготовка шаблона-рамки с параметрами 600 dpi – 7 минут. После того, как все части рамки выставлены, оцифровщик задает параметры для оцифровки: шкалы от 0 до 28 и шаг оцифровки 0,005, что соответствует 200 отсчетам в секунду (для сейс-мограмм с разверткой 120 мм/мин).

5. Процесс расстановки направляющих точек производится по вершинам пиков записи. Необходимо оцифровать примерно одну минуту шума перед началом события, при оцифровке записи расставлять точки по центру вершин пиков, чтобы учесть толщину линии (рисунок 2).

После расстановки направляющих точек проводится первый контроль качества данных самим оператором по оцифровке.

6. На следующем этапе сохраняется результат оцифровки в 2 файла. Первый файл – это wsp – сохраняет точки и шаблон рамки в формате WaveTrack и предназначен для дальнейшей работы или коректировки точек. Второй файл – это обычный текстовый файл, в котором содержатся те же данные, но в текстовом формате.

7. Производится конвертация данных с помощью программы pne2sac, написанной на Python. После конвертации получаем 5 файлов, которые содержат данные в разном виде. Эти файлы содержат данные в форматах miniseed [4] и sac [5], а также в графическом формате PNG (рисунок 3).

После выполнения всех этапов оцифровки оцифровщик должен получить 8 файлов. В них входят оцифрованная сейсмограмма, а также входные и выходные данные. В поддержку качества оцифровки в проекте обязательным было составление листов контроля качества оцифровки по каждой компоненте. Листы контроля качества оцифровки заполняются параметрами события и данными, получеными в процессе оцифровки.



Рисунок 2. Расстановка направляющих точек при оцифровке



Рисунок 3. Результат работы программы pne2sac

Существует 3 этапа контроля качества оцифровки. Первым этапом проверки считается выполненая работа и самостоятельная проверка ее оцифровщиком. Второй этап проверки выполняется другим оцифровщиком, который просматривает работу и исправляет некорректно расставленные точки. Последний этап проверки выполняется ответсвенным лицом, назначенным руководителем проекта из числа наиболее опытных сотрудников, который проверяет сейсмограмму по всем критериям, и в некоторых случаях может отправить ее на переделку. После всех этапов проверки необходимо заполнять лист контроля качества.

Сейсмограмма считается оцифрованной, когда она прошла все 3 проверки контроля качества, что соответствует выполнению всех требований в проекте.

8. Полученные данные загружаются в облачный сервис Microsoft Teams, после чего заполняется лист

инвентаризации оцифровки, в котором ведется учет всех оцифрованных сейсмограм с параметрами события.

Оцифровкой исторических сейсмограмм в ИГИ НЯЦ РК занимаются 2 группы: одна в г. Алматы (подразделение KNDC), другая в г. Курчатов. На рисунке 4 приведена схема организации работ по подразделениям ИГИ НЯЦ РК. Эти подразделения постоянно находятся в контакте, сотрудники советуются и помогают друг другу при выполнении работы.

## Сравнение технологий оцифровки

Поскольку к настоящему времени было оцифровано достаточно много сейсмограмм при помощи мат. обеспечения NXSCAN, закономерно возник вопрос, можно ли их использовать в исследованиях, а если да, то в каких видах, и насколько новая методика оцифровки лучше.

На рисунке 5 представлены оцифрованные двумя методами сейсмограммы ПЯВ на территории Семипалатинского испытательного полигона на площадке Балапан в скважине 1301, 16 апреля 1974, t0=05:52:59.84,  $\varphi$ =50,02444°N,  $\lambda$ =78,92639°E, Y=1 кт, mb=4,9. Станция Акжол, верхняя сейсмограмма оцифрована при помощи WaveTrack, нижняя при помощи NXSCAN. Следует отметить, что сейсмограммы имеют ряд схожих черт, однако верхняя сейсмограмма более высокочастотна и амплитуды более сглаженные.



Рисунок 4. Схема организации работ по оцифровке сейсмограмм по подразделениям



Рисунок 5. Оцифрованные сейсмограммы ПЯВ на территории СИП 16 апреля 1974, t0=05:52:59.84, φ=50,02444 N, λ=78,92639 E, Y=1 кт, mb=4,9. Станция Акжол, верхняя сейсмограмма оцифрована при помощи WaveTrack, нижняя при помощи Nxscan. Стрелками показаны времена вступлений основных региональных фаз



Рисунок 6. Спектры Фурье оцифрованных сейсмограмм ПЯВ на территории СИП 16 апреля 1974 г. Станция Акжол, верхняя сейсмограмма оцифрована при помощи WaveTrack, нижняя при помощи Nxscan. Стрелками обозначена частота, выше которой спектры оцифрованных сейсмограмм сильно различаются

На рисунке 6 представлены спектры Фурье для всей сейсмограммы. Анализируя спектры, можно отметить, что для диапазона 0,6–2 Гц спектры имеют ряд схожих черт.

На рисунке 7 представлены оцифрованные двумя методами фрагменты сейсмограммы ПЯВ на территории Семипалатинского испытательного полигона на площадке Дегелен в штольне 701P, 6 мая 1979, t0=03:17:00.07, φ=49,76194°N, λ=77,98250°E, Y=15 кт, mb=5,22, станция Акжол. Анализируя нало-

женные сейсмические записи, можно отметить, что сейсмограммы имеют ряд схожих черт, вместе с тем, на сейсмограмме, оцифрованной NXSCAN, отсутствуют мелкие детали, она более низкочастотна, некоторые пики имеют прямоугольную форму, вместо синусоиды, что связано с использованием устаревших графических библиотек, используемых программой, а также искажением записи при сканировании в черно-белом режиме. Маленькие амплитуды занижены по сравнению с программой WaveTrack, это связано с толщиной линии при сканировании в черно-белом режиме, когда линия получается толстая, амплитуды получаются размытыми, качество изображения ухудшается. По совокупности тестируемых сейсмограмм был проведен корреляционный анализ волновых форм, в среднем коэффициент корреляции составил Rcp~0,775.

Оцифрованные сейсмограммы при помощи Wavetrack имеют ряд преимуществ:

1. Сканирование производится с большим разрешением, чем для NXSCAN, в режиме Grayscale при оцифровке можно увеличивать гораздо больше, чем для NXSCAN, все это существенно влияет на качество оцифровки. Становятся заметными больше деталей, есть возможность оцифровать высокочастотные сейсмограммы.

2. При оцифровке WaveTrack используется шаблон, который позволяет точнее использовать развертку сейсмограммы для масштабирования по времени оцифрованной сейсмограммы.

3. У WaveTrack есть возможность сохранять направляющие точки в рабочем наборе и использовать после контроля качества.

4. Сохранение оцифрованной сейсмограммы проводится с частотой 100-200 Гц, что позволяет исследовать оцифрованные сейсмограммы более детально.

5. При оцифровке Wavetrack можно контролировать симметрию, убирать тренд, появляющийся при сканировании и др. Есть возможность накладывать оцифрованную запись на сканированную сейсмограмму.

6. Кроме того, есть возможность оцифровывать сейсмограммы слабых взрывов.

7. Существует возможность дифференцирования оцифрованной сейсмограммы для получения акселерограмм, для изучения спектров реакции.

Вместе с тем у WaveTrack есть и недостатки:

1. Не продумана возможность оцифровки фрагментов сейсмограмм с малыми амплитудами, например, сейсмического фона или слабых удаленных сейсмических событий в автоматическом или полуавтоматическом режиме, по типу того, как это делаеися в программе NXSCAN. Алгоритм программы Nxscan достаточно точно оцифровывает сейсмический фон, посередине линии.

2. У программы WaveTrack при сохранении результата не используется базовая линия, что усложняет процесс сохранения данных.

Но преимущества WaveTrack, указанные выше, позволяют считать предпочтительным использование WaveTrack для исследований с использованием оцифрованных сейсмограмм.

Сейсмограммы, оцифрованные программой NXSCAN, хорошо зарекомендовали себя для следующих задач:

1. Расчет магнитуд событий (совпадает с замеренными по аналоговым сейсмограммам).

2. Построение огибающих сейсмограмм для изучения структуры поля поглощения (совпадает с огибающими, полученными при замерах ЧИСС).

3. Оценка спектральных отношений максимальных амплитуд основных сейсмических фаз с целью сейсмического распознавания после узкополосной фильтрации (реально удается использовать частоты 0,6–2,5 Гц для СКМ).



Рисунок 7. Фрагменты оцифрованных сейсмограмм ПЯВ на территории СИП 6 мая 1979, t0=03:17:00.07. Станция Акжол, красная сейсмограмма оцифрована при помощи WaveTrack, черная при помощи NXSCAN

## РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТ

В ходе работы над проектом для оцифровки были выбраны ранее не оцифрованные записи ПЯВ из района СИП, зарегистрированные станциями на региональных расстояниях. Сейсмограммы выбирались из архива исторических сейсмограмм Комплексной сейсмологической экспедиции (КСЭ), который в настоящее время находится в КNDC ИГИ НЯЦ РК в г. Алматы [8].



Рисунок 8. Гистограмма эпицентральных расстояний оцифрованных сейсмограмм

Оцифровке подлежали записи с 1961 гг., в это время в составе сети КСЭ работали сейсмические станции, оснащенные оборудованием СКМ, РВЗТ и КСЭ [1].

На первом этапе для оцифровки были выбраны сейсмограммы, зарегистрированные на фотобумагу сейсмометром СКМ с гальванической регистрацией. В течение всего времени выполнения проекта были оцифрованы сейсмограммы 106 подземных ядерных взрывов из района испытательного полигона СИП. Диапазон магнитуд составил mb=4,42÷6,16. Диапазон эпицентральных расстояний 175–2080 км (рисунок 8). Всего оцифровано 346 сейсмограмм, 906 компонент. На рисунке 9 представлен пример сканированной и оцифрованной записи взрыва 8 июня 1975 года в 03:27:00, произведенного на СИП по станции Чолпон-Ата.



Рисунок 9. Пример сканированной записи взрыва 8 июня 1975 года в 03:27:00 по станции Чолпон-Ата

## Заключение

В 2020 г. был осуществлен переход технологии оцифровки с программы NXSCAN на технологию с ПО WaveTrack.

В настоящее время оцифрованы более 900 компонент записей ПЯВ из района СИП, зарегистрированных сейсмическими станциями Центральной Азии на региональных расстояниях.



Рисунок 10. Пример сканированной и оцифрованной записи взрыва 8 июня 1975 года в 03:27:00 по станции Чолпон-Ата

Переход на новую технологию оцифровки обеспечил значительное повышение качества оцифрованного материала и унификацию сопроводительной документации.

В настоящее время оцифрованные записи ядерных взрывов широко используются в различных задачах мониторинга: сейсмическое распознавание природы источника, уточнение параметров ядерных испытаний, изучение сейсмической опасности СИП, и др.

## Литература

- Аранович З.И. [и др.] Аппаратура и методика сейсмометрических наблюдений в СССР // М.: Наука. – 1974.
- Бекбулатова Д.Б., Михайлова Н.Н., Соколова И.Н. Исторические записи ядерных взрывов в архиве Института геофизических исследований // Вестник НЯЦ РК. – 2020. – Вып. 3. – С. 65–72.
- 3. NXSCAN: Manual // IRIS. 1992.
- Tapley W. C., and Tull J. E. SAC–Seismic Analysis Code: User's Manual // Lawrence Livermore National Laboratory: Revision 4. – 1992.

- SEED Reference Manual. Version 2.4 // IRIS. 2012. 224 p.
- Электронный pecypc: https://www.irfanview.com/ main\_what\_is\_engl.htm.

#### REFERENCES

- 1. Aranovich Z.I. [i dr.] Apparatura i metodika seysmometricheskikh nablyudeniy v SSSR // Moscow: Nauka. – 1974.
- Bekbulatova D.B., Mikhaylova N.N., Sokolova I.N. Istoricheskie zapisi yadernykh vzryvov v arkhive Instituta geofizicheskikh issledovaniy // Vestnik NYaTs RK. – 2020. – Issue 3. – P. 65–72.
- 3. NXSCAN: Manual // IRIS. 1992.
- Tapley W. C., and Tull J. E. SAC–Seismic Analysis Code: User's Manual // Lawrence Livermore National Laboratory: Revision 4. – 1992.
- 5. SEED Reference Manual. Version 2.4 // IRIS. 2012. 224 p.
- Elektronnyy resurs: https://www.irfanview.com/ main\_what\_is\_engl.htm.

## ДЕРЕКТЕР ОРТАЛЫҒЫНДА ТАРИХИ СЕЙСМОГРАММАЛАРДЫ ЦИФРЛАНДЫРУДЫҢ ЖАҢА ТЕХНОЛОГИЯСЫН ЕНГІЗУ НӘТИЖЕЛЕРІ

#### П.В. Рябенко, И.Н. Соколова

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

ҚР ҰЯО ГЗИ-де алғаш рет цифрландырудың жаңа әдістемесі енгізілді, ол сейсмологиялық деректерді заманауи форматта сақтай отырып, сапасы жақсы аналогтық сейсмограммаларды цифрландыруға мүмкіндік береді. Жаңа әдістемеде Новосибирск аймақтық ақпараттық технологиялар орталығында әзірленген WaveTrack бағдарламалық жасақтамасы, сондай-ақ АҚШ-тың Мичиган мемлекеттік университетінде жасалған бірқатар қосымша бағдарламалар қолданылды. Цифрландыру нәтижелері АҚШ-тың IRIS әзірлеген NXSCAN бағдарламасымен салыстырылды. Нәтижесінде жаңа әдістеменің бірқатар артықшылықтары атап өтіліп, белгілі бір жиілік диапазонында әртүрлі әдістермен цифрланған деректерді бірлесіп пайдалануға болатындығы көрсетілді. Ядролық жарылыстардың цифрланған сейсмограммаларының деректер қоры құрылды. Қазіргі уақытта цифрланған сейсмограммалар сейсмикалық мониторингілеудің әртүрлі міндеттері үшін де қолданылады.

Түйін сөздер: аналогтық сейсмограмма, сканерлеу, цифрландыру, жиілік сипаттамасы, ядролық жарылыстар.

## THE RESULTS OF HISTORICAL SEISMOGRAMS NEW DIGITIZATION TECHNIQUE IMPLEMENTATION AT THE DATA CENTER

## P.V. Ryabenko, I.N. Sokolova

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

For the first time the IGR NNC RK has implemented a new digitization technique allowing digitizing the analogue seismograms with a good quality and saving in advanced seismic data formats. A new technique is based on a Wavetrack software developed by Novosibirsk Regional Center for Information Technologies, and on a range of additional utilities developed by the Michigan State University, USA. The digitization results were compared with NXSCAN results developed by IRIS, USA. The comparison showed some advances of a new technique, and opportunity to use jointly the records digitized by different techniques in a definite frequency range. A database of the digitized nuclear explosions seismograms was created at the moment the digitized seismograms are used for different seismic monitoring tasks.

Keywords: analog seismogram, scanning, digitization, frequency characteristics, nuclear explosions.

#### <u>https://doi.org/10.52676/1729-7885-2023-1-69-76</u> УДК 54.548.4

# ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ФАЗООБРАЗОВАНИЯ В КОМПОЗИТНЫХ Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> КЕРАМИКАХ ПРИ ВАРИАЦИИ ТЕМПЕРАТУРЫ СПЕКАНИЯ

Д.Б. Боргеков<sup>1,2)</sup>, <u>А.Л. Козловский</u><sup>1,2)</sup>

<sup>1)</sup> НАО Евразийский национальный университет им. Л.Н. Гумилева, Астана, Казахстан <sup>2)</sup> Институт ядерной физики МЭ РК, Алматы, Казахстан

E-mail для контактов: kozlovskiy.a@inp.kz

Целью данной работы является установление закономерностей процессов фазообразования в  $Al_2O_3$ -Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> керамиках в диапазоне температур отжига от 800 до 1500 °C, а также определение влияния фазового состава керамик на прочностные свойства. Интерес к данному классу композитных керамик обусловлен возможностями применения их в качестве материалов для инертных матриц дисперсного ядерного топлива. Оценка фазового состава в результате термического отжига образцов была проведена с применением метода рентгенофазового анализа. В ходе проведенного анализа установлены следующие фазовые превращения: Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> - Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-R/Al<sub>2</sub>SiO<sub>5</sub>  $\rightarrow$  Al<sub>2</sub>SiO<sub>5</sub>/SiO<sub>2</sub>, согласно которым изменение температуры отжига приводит к полиморфным превращениям оксида алюминия при увеличении температуры отжига, а также формированию фазы сложного оксида типа Al<sub>2</sub>SiO<sub>5</sub>. При этом при температуре отжига выше 1400 °C наблюдается превращение типа Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>  $\rightarrow$  SiO<sub>2</sub>, связанное с процессами разложения нитрида кремния и его трансформации в оксид кремния при взаимодействии с воздушной средой при отжиге. Было установлено, что первичными процессами при отжиге керамик являются процессы структурного упорядочения образцов, без значительного изменения соотношения фаз.

**Ключевые слова**:  $Al_2O_3$ -Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> керамики, композиты, фазовые превращения, прочность, твердость, устойчивость к деструкции.

## Введение

В последние несколько лет активно ведутся различные разработки в области создания новых типов конструкционных материалов и ядерного топлива для реакторов поколения GenIV [1, 2]. В основе данных разработок лежит необходимость решения ряда вопросов, связанных как с увеличением рабочих температур ядерных реакторов и повышение устойчивости материалов к длительной эксплуатации, так и переход на технологии утилизации и переработки плутония и других продуктов деления, которые можно использовать в качестве ядерного топлива. При этом отдельного внимания удостаиваются вопросы, связанные с созданием новых видов ядерного топлива, основной целью которых является не только повышение устойчивости к радиационной деструкции при длительной эксплуатации, но и увеличение степени выгорания ядерного топлива с возможностью сокращения ядерных отходов [3-5].

В большинстве случаев для данных целей предлагается использовать технологию дисперсного ядерного топлива. В основе предлагаемой технологии лежит размещение делящегося ядерного топлива (плутония или диоксид урана) в инертной матрице на основе тугоплавких высокотемпературных керамик, так, чтобы частицы делящегося топлива не соприкасались друг с другом и были изолированы достаточной толщиной инертного материала, способного поглотить продукты деления [6–8]. В свою очередь использование тугоплавких керамик на основе оксидных или нитридных соединений, обладающих высокой температурой плавления (более 1500–2000 °С), а также низким коэффициентом теплового расширения позволяет существенно увеличить рабочую температуру активной зоны [9, 10]. Также немаловажным требованием к керамическим материалам является высокая радиационная стойкость не только к единичным повреждениям, но и длительному накоплению радиационных повреждений [11, 12].

В этой связи, одними из перспективных материалов для инертных матриц являются композитные керамики на основе оксида алюминия и нитрида кремния, совокупность свойств которых позволяет создавать наиболее устойчивые керамические композиты, обладающие высокими прочностными характеристиками. При этом сочетание двух компонент позволяет создавать композитные многофазные керамики, сочетающие в себе свойства обоих компонент. Стоит также отметить, что сочетание оксида алюминия, являющегося в большинстве случаев материалом – протектором для повышения устойчивости к механическим воздействиям, и нитрида кремния, являющимся одним из наиболее радиационно-стойких материалов, позволит создать инертную матрицу, обладающую высокой радиационной стойкостью и устойчивостью к внешним механическим воздействиям [13-15].

Ключевая цель данного исследования заключается в установлении закономерностей процессов фазообразования в  $Al_2O_3$ - $Si_3N_4$  керамиках в случае вариации температуры спекания в диапазоне 800–1500 °C, а также определение влияния фазового состава на

прочностные свойства керамик. При этом стоит отметить, что температурный диапазон в рамках которого планируется использовать данные керамики составляет от 500 до 1000 °С. В свою очередь выбор температурного диапазона отжига образцов 800– 1500 °С обусловлен возможностями инициализации процессов фазовых трансформаций в композитах, которые происходят при температурах выше 0.2– 0.5 *Т*<sub>плавления</sub>.

## Материалы и методы

Синтез композитных Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> керамик был осуществлен методом механохимического твердофазного перемешивания с последующим термическим отжигом. Для получения композитных керамик были использованы порошки Al2O3 и Si3N4 химической чистоты 99,95%, производства компании Sigma Aldrich (Sigma Aldrich, USA). Для синтеза было выбрано молярное соотношение компонент Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> : Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> равное 1:1 моль. Перемешивание было осуществлено с применением планетарной мельницы Pulverisette 6 classic line (Fritsch, Berlin, Germany). Помол осуществлялся при 400 об/мин в течение 1 часа. Для перемешивания были использованы мелющие тела и стакан на основе карбида вольфрама. Отжиг полученных смесей после перемалывания проводился в муфельной печи SNOL (Snol-Term, St.-Petersburg, Russia). Диапазон выбранных температур отжига был выбран с 800 до 1500 °С, время отжига составило 5 часов. Остывание образцов было осуществлено вместе с печью в течение 24 часов до достижения комнатной температуры.

Анализ фазового состава композитных керамик был проведен с применением метода рентгенофазового анализа, реализованного на порошковом дифрактометре D8 Advance ECO (Bruker, Berlin, Germany). Регистрация дифрактограмм была осуществлена в геометрии Брегг-Брентано в угловом диапазоне 20=20-80°, с шагом 0,05° и временем набора спектра 1 сек в точке. Для идентификации фазового состава была использована база данных PDF-2 (2016), уточнение фаз проводилось методом сравнительного анализа положения экспериментально полученных дифракционных рефлексов и положений линий из базы данных. Верификация определения фаз составляла более 95%. Уточнение параметров кристаллической решетки проводилось с учетом деформационных искажений и эффектов замещения.

Определение влияния фазового состава на прочностные свойства и устойчивость к растрескиванию керамик были проведены с применением метода индентирования. В качестве индентера была использована алмазная пирамидка Виккерса, сила нагружения на керамики составила 100 Н. На основе полученных данных изменения твердости керамик был определен критический коэффициент интенсивности напряжений ( $K_{1c}$ ), характеризующий параметр трещиностой-кости. Для вычисления  $K_{1c}$  была использована формула:

$$K_{1c} = 0.16 \cdot H \cdot a^{\frac{1}{2}} \left(\frac{c}{a}\right)^{-3/2},$$

где *H* – значение твердости по Виккерсу, *a* – полудиагональ отпечатка индентора, *c* – полудлина трещины.

## Результаты и обсуждение

На рисунке 1 представлены результаты рентгенофазового анализа исследуемых образцов композитных керамик в зависимости от температуры отжига в диапазоне температур 800–1500 °C. Также для сравнения приведена дифрактограмма образца в исходном состоянии после механохимического перемалывания. После перемалывания полученные образцы, согласно данным элементного анализа не содержали в себе примесей от мелющих тел. Общий вид наблюдаемых изменений представленных на рентгеновских дифрактограммах свидетельствует о нескольких типах фазово-структурных изменений, протекающих в образцах в зависимости от температуры отжига.

В исходном состоянии после перемешивания композитные керамики представляют собой смесь двух фаз: гексагональной Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> (пространственная сингония P31c(159)) и орторомбической Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (пространственная сингония Pna21(33)). Соотношение фаз Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> и Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, согласно оценке вкладов дифракционных рефлексов, характерных для установленных фаз составило 74,3:25,7, с почти трехкратным доминированием фазы Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>. При этом формы рефлексов для наблюдаемых фаз, а также установленные значения параметров кристаллической решетки для Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> a=7,7889 Å, c=5,6377 Å, и для Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> a=4,8579 Å, b=8,3382 Å, c=8,9845 Å, свидетельствуют о сильном деформационном искажении структуры, вызванной процессами твердофазного механохимического перемешивания, сопровождающегося механическим деформационным воздействием на структуру. При этом детальный анализ положения основных установленных рефлексов не показал наличие смешанных оксидных или нитридных фаз, что свидетельствует об отсутствии инициализации процессов фазообразования при механическом перемалывании.

Общий вид наблюдаемых изменений композитных керамик, подверженных термическому отжигу, можно разделить на несколько этапов, имеющих зависимость от температуры отжига. На первом этапе при температуре отжига 800–900 °С, согласно оценке рентгенофазового анализа не установлено наличие каких – либо новых фазовых включений на дифрактограммах, что свидетельствует об отсутствии процессов, связанных с фазообразованием или фазовыми превращениями, возникающими под действием температуры. Основные изменения, наблюдаемые на дифрактограммах для данных образцов, заключаются в изменении формы дифракционных линий, которое свидетельствует о частичной релаксации деформационных искажений, вызванных синтезом, а также структурном упорядочении, связанном с тепловыми эффектами упорядочения кристаллической решетки. В таблице представлены данные параметров кристаллической решетки, определенные для всех наблюдаемых фаз.

	Фаза								
Температура	Si₃N₄ – гексагональная	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> – орторомбическая	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> – моноклинная	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> – ромбическая	Al₂SiO₅ – орторомбическая	SiO <sub>2</sub> – тетрагональная			
исходный	a=7,7889 Å, c=5,6377 Å	a=4,8579 Å, b=8,3382 Å, c=8,9845 Å	-	_	-	_			
800 °C	a=7,7795 Å, c=5,6309 Å	a=4,8541 Å, b=8,3348 Å, c=8,9738 Å	-	_	_	_			
900 °C	a=7,7689 Å, c=5,6232 Å	a=4,8451 Å, b=8,3169 Å, c=8,9685 Å	-	_	-	_			
1000 °C	a=7,7717 Å, c=5,6439 Å	-	a=11,8199 Å, b=2,9069 Å, c=5,6327 Å, β=104,202°	a=4,7638 Å, c=13,0107 Å	-	-			
1100 °C	a=7,7611 Å, c=5,6229 Å	-	a=11,8084 Å, b=2,9014 Å, c=5,6228 Å, β=104,182°	a=4,7587 Å, c=12,9776 Å	-	-			
1200 °C	a=7,7504 Å, c=5,6108 Å	-	-	a=4,7559 Å, c=12,9343 Å	a=7,4639 Å, b=7,6615 Å, c=5,7649 Å	_			
1300 °C	a=7,7529 Å, c=5,6075 Å	-	-	_	a=7,4333 Å, b=7,6419 Å, c=5,7503 Å	a=4,9548 Å, c=6,9114 Å			
1400 °C	-	-	-	-	a=7,4255 Å, b=7,6614 Å, c=5,7627 Å	a=4,9615 Å, c=6,9263 Å			
1500 °C	-	-	-	-	a=7,4595 Å, b=7,6689 Å, c=5 7729 Å	a=4,9702 Å, c=6,9385 Å			

Таблица. Данные параметров кристаллической решетки



Рисунок 1. Рентгеновские дифрактограммы образцов композитных xAl<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-(1-x)Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> керамик
Как видно из представленных данных изменения параметров кристаллической решетки для фаз Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> и Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, в температурном диапазоне 800-900 °C наблюдается уменьшение параметров кристаллической решетки, что свидетельствует о ее упорядочении и снижении деформационных вкладов, что также отчетливо видно при детальном анализе формы дифракционных максимумов, которая с увеличением температуры отжига становится более симметричной в сравнении с исходной не отожжённой керамикой. В свою очередь следует отметить, что отсутствие фазовых превращений или структурных трансформаций в данном температурном диапазоне свидетельствует о том, что при данных температурах доминирующими процессами структурных изменений являются процессы, связанные с релаксацией деформационных включений.

При температуре 1000 °С наблюдается инициализация процессов фазовой трансформации в виде структурного превращения орторомбической фазы Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> в смесь двух фаз: моноклинной Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (пространственная сингония С2/т(12)) и ромбической Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (пространственная сингония *R-3c(167)*). Формирование данных фаз приводит к уменьшению вклада фазы Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>, а также изменению степени структурного упорядочения. При этом согласно данным изменения параметров кристаллической решетки для фазы Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> формирование двух фаз Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> приводит к незначительной деформации кристаллической решетки, которое обусловлено структурными превращениями. Увеличение температуры отжига до 1100 °С приводит к упорядочению кристаллической решетки для всех наблюдаемых фаз, что может быть обусловлено эффектом структурного упорядочения, вызванного отжигом деформационных включений.

При температуре отжига 1200 °С наблюдается вытеснение моноклинной фазы  $Al_2O_3$  с последующим формированием орторомбической фазы  $Al_2SiO_5$  (пространственная сингония Pbnm(62)). Формирование фазы  $Al_2SiO_5$  свидетельствует о том, что при температуре выше 1100 °С наблюдаются эффекты смешения элементов с последующим формированием сложнооксидных соединений. При этом формирование данной фазы сопровождается частичным распадом фазы  $Si_3N_4$ , что приводит к тому, что часть ионов кремния замещает ионы алюминия в оксидной фазе с последующим формированием фазы  $Al_2SiO_5$ .

При температуре отжига 1300 °С наблюдается формирование тетрагональной фазы SiO<sub>2</sub> (пространственная сингония P4212(92)), появление которой связано с процессами распада фазы Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>, а также вытеснением орторомбической фазы Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. При этом дальнейшее увеличение температуры отжига до 1400–1500 °С приводит к полному вытеснению фаз Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> и Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> и формированию двухфазных керамик Al<sub>2</sub>SiO<sub>5</sub>/SiO<sub>2</sub>. При этом динамика изменений параметров кристаллической решетки для данных фаз с увеличением температуры отжига свидетельствует об эффекте теплового расширения решетки, с сохранением степени структурного упорядочения.

На основе анализа полученных данных вкладов различных фаз, основанном на оценке площадей дифракционных рефлексов, была построена диаграмма фазового состава керамик в зависимости от температуры отжига, представленая на рисунке 2.



Рисунок 2. Данные фазового состава керамик в зависимости от температуры отжига

Анализ диаграммы показал, что увеличение температуры отжига приводит к частичному вытеснению фазы  $Si_3N_4$  в диапазоне температур отжига 800– 1200 °С. При этом основные изменения в виде фазовых трансформаций происходят при температуре выше 1000 °С и связаны они с полиморфными превращениями оксида алюминия, а также при температуре 1200 °С с образованием фазы сложного оксида Al<sub>2</sub>SiO<sub>5</sub>, с последующим полным вытеснением фазы Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> при температуре выше 1300 °С и образованием фазы SiO<sub>2</sub>.

На рисунке 3 представлены результаты оценки степени кристалличности образцов керамик в зависимости от температуры отжига, которые отражают изменение степени структурного упорядочения и концентрации аморфноподобных включений в образцах керамик полученных в ходе экспериментов.

Общая тенденция изменения степени кристалличности исследуемых керамик в зависимости от температуры отжига отражает характер структурного упорядочения при изменении фазового состава и полиморфных превращений в керамиках. В случае исходного образца степень кристалличности составляет менее 75%, что свидетельствует о том, что при твердофазном перемалывании, порошки подвергаются внешним воздействиям, приводящим к их разупорядочению и дестабилизации структуры за счет деструкции при перемалывании. Термический отжиг при температурах 800–900 °С приводит к увеличению степени структурного упорядочения до 75-80% за счет частичного снятия структурных напряжений и деформаций, о котором свидетельствует изменение параметров кристаллической решетки, а также уменьшения доли вкладов разупорядоченных областей. При температуре отжига выше 1000 °С, для которой характерно первое полиморфное превращение типа  $Al_2O_3 - O \rightarrow Al_2O_3 - M$  наблюдается незначительное изменение степени структурного упорядочения в связи с тем, что деформационные вклады при данных температурах частично отжигаются, однако создаются новые за счет процессов полиморфных превращений и изменения соотношения фаз. В случае, когда в структуре процессы полиморфных превращений сменяются процессами формирования новых фаз в результате процессов замещения и разложения, наблюдается увеличение степени кристалличности, которое свидетельствует о том, что структура керамики становится стабильной и упорядоченной.



Рисунок 3. Зависимость изменения степени кристалличности от температуры отжига

Немаловажными параметрами для конструкционных материалов являются их прочностные свойства, определяющие устойчивость материалов к внешним воздействиям, а также характеризующие их стабильность к деструкции при механических повреждениях и образованию трещин. При этом на устойчивость и прочностные свойства керамик оказывают влияние несколько факторов, одним из которых является фазовый состав керамик, а также степень структурного упорядочения. Как известно, формирование в структуре керамик метастабильных фаз может привести как к снижению прочности, так и ее увеличению за счет создания дополнительных препятствий в виде границ зерен на пути трещин или же изменении дислокационной плотности. При этом формирование в структуре керамик многофазности может привести к упрочнению за счет изменения плотности керамик и снижения пористости. Для определения влияния изменения фазового состава керамик при вариации температуры отжига на прочностные свойства полученные керамики были спрессованы в таблетки диаметром 10 мм и толщиной 1 мм для проведения измерений микротвердости и устойчивости к трещинообразованию. Индентирование для определения параметров микротвердости было проведено с помощью алмазной пирамидки Виккерса при постоянной нагрузке в течение 15 секунд и последующему анализу отпечатков индентора. На рисунке 4 представлены результаты изменения значений микротвердости образцов керамик в зависимости от температуры отжига.



Рисунок 4. Результаты изменения микротвердости поверхности керамик в зависимости от изменения температуры отжига

Общий вид представленных данных изменений величины микротвердости от температуры отжига имеет выраженную зависимость, сравнимую с изменениями степени кристалличности и изменения фазового состава керамик. При этом на представленной зависимости на рисунке 4 можно выделить три характерные области, соответствующие разным характерам упрочнения, имеющим взаимосвязь с процессами фазовых превращений. Первая область характерна для температур отжига 800-900 °С и характеризуется малыми изменениями микротвердости (не более 1-3%), увеличение которой обусловлено эффектами структурного упорядочения и связанных с ними уменьшением концентрации дефектов и метастабильных включений. Вторая область характерна для температурного диапазона 1000-1200 °С, в котором согласно данным рентгенофазового анализа наблюдалось полиморфное превращение в оксиде алюминия типа  $Al_2O_3 - O \rightarrow Al_2O_3 - M$  и  $Al_2O_3 - O \rightarrow Al_2O_3$ - R, а также вытеснение фазы Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>. Для данной области упрочнение составляет более 20 %, при этом изменение соотношения полиморфных фаз не приводит к существенному увеличению твердости. Третья область характерна для температурного диапазона выше 1200 °С и характеризуется резким увеличением твердости. Такое изменение может быть обусловлено полным вытеснением фазы  $Si_3N_4$ , а также формированием в структуре фазы  $SiO_2$ . На рисунке 5 представлены результаты изменения величины упрочнения, рассчитанной на основе сравнительного анализа изменения величины микротвердости образцов, и степени кристалличности в зависимости от содержания фазы  $Si_3N_4$ , вытеснение которой происходит при увеличении температуры отжига.



Рисунок 5. Зависимость параметров упрочнения и степени кристалличности от содержания фазы Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> в составе керамик

Общий вид представленных зависимостей изменения степени кристалличности и параметра упрочнения имеет схожий характер при уменьшении содержания фазы Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> в составе керамик, и характеризуются резким увеличением при малых концентрациях или полном отсутствии данной фазы в составе керамик.



Рисунок 6. Зависимость изменения коэффициента трещиностойкости и величины упрочнения в зависимости от температуры отжига керамик

На рисунке 6 представлены результаты оценки изменения коэффициента трещиностойкости керамик, а также величины упрочнения в зависимости от температуры отжига образцов, характеризующих изменение фазового состава.

Общий вид полученных зависимостей трещиностойкости и упрочнения керамик при изменении их фазового состава в результате термического отжига, как и в случае упрочнения, имеет несколько выделенных областей изменения. Первая область характерна малым изменениям устойчивости к трещинообразованию, связанным с процессами уменьшения концентрации дефектных областей и метастабильных включений, снижение которых обусловлено процессами структурных упорядочений. При этом начальная стадия процессов полиморфных превращений в оксиде алюминия в результате термического отжига не приводит к существенным изменениям повышения трещиностойкости. Однако, вытеснение фазы Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> приводит к увеличению устойчивости к трещинообразованию, за счет повышения прочности и степени структурного упорядочения.

#### Заключение

Согласно данным рентгенофазового анализа было установлено, что при температурах отжига 800-1000 °С основные структурные изменения связаны со структурным упорядочением, вызванным частичным отжигом дефектов (точечных дефектов, вакансий, дислокаций), возникших при перемалывании образцов. При температурах отжига 1000 °С и выше наблюдаются процессы полиморфных превращений в оксиде алюминия, сопровождающиеся изменением структурных параметров и фазового состава керамик. При температуре отжига выше 1300 °С наблюдается вытеснение фазы Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> за счет ее трансформации в оксид кремния. На основании полученных данных изменения фазового состава в зависимости от температуры отжига была установлена следующая динамика фазовых превращений: Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> →  $Si_3N_4/Al_2O_3-M/Al_2O_3-R \rightarrow Si_3N_4/Al_2O_3-R/Al_2SiO_5 \rightarrow$ Al<sub>2</sub>SiO<sub>5</sub>/SiO<sub>2</sub>. Установлено, что степень кристалличности исследуемых образцов имеет выраженную зависимость от полиморфных превращений и изменения фазового состава керамик при изменении температуры отжига. Установлено, что вытеснение фазы Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> и последующая трансформация ее в фазу SiO<sub>2</sub> приводит к упорядочению структуры и снятию деформационных искажений.

В ходе анализа прочностных свойств керамик было установлено, что вытеснение фазы Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>, а также последующее формирование фаз Al<sub>2</sub>SiO<sub>5</sub>/SiO<sub>2</sub> приводит к увеличению твердости и устойчивости к трещинообразованию, что в свою очередь оказывает положительный эффект на прочность керамик и их механические свойства.

Дальнейшие исследования в данном направлении будут направлены на изучение устойчивости полученных композитных керамик к радиационным повреждениям при модельных испытаниях по определению радиационной стойкости к осколкам деления.

Данное исследование финансируется Комитетом науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан (Грант № АР14871176).

# ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES

- Lee William E., [et al.] Nuclear applications for ultra-high temperature ceramics and MAX phases // Ultra-High Temperature Ceramics: Materials for Extreme Environment Applications. – 2014. – Vol. 1. – P. 391–415.
- Lee W. E., Gilbert M., Murphy S. T., Grimes R. W. Opportunities for advanced ceramics and composites in the nuclear sector // Journal of the American Ceramic Society. – 2013. – Vol. 96.7. – P. 2005–2030.
- Boccaccini L. V., Aiello G., Aubert J., Bachmann C., Barrett T., Del Nevo A., Vala L. Objectives and status of EUROfusion DEMO blanket studies // Fusion Engineering and Design. – 2016. – Vol. 109. – P. 1199–1206.
- Schramm A. [et al.] High temperature wettability and corrosion of ZrO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-C, MgO and MgAlON ceramic substrates by an AZ91 magnesium alloy melt // Journal of the European Ceramic Society. – 2022. – Vol. 42, No. 6. – P. 3023–3035.
- Nandi C. [et al.] Phase evolution in M1-xPuxO<sub>2</sub> (0.0≤x≤ 0.6) (M= Zr, Th) as potential inert matrix fuel system under reducing and oxidizing conditions // Journal of Nuclear Materials. – 2021. – Vol. 547. – P. 152800.
- Shelley A., Ovi M.H. Possibility of curium as a fuel for VVER-1200 reactor // Nuclear Engineering and Technology. – 2022. – Vol. 54, No. 1. – P. 11–18.

- Kiegiel K.[ et al.] Management of Radioactive Waste from HTGR Reactors including Spent TRISO Fuel—State of the Art // Energies. – 2022. – Vol. 15, No. 3. – P. 1099.
- Alekseeva L. S. [et al.] Mechanical Properties and Thermal Shock Resistance of Fine-Grained Nd: YAG/SiC Ceramics // Inorganic Materials. – 2022. – Vol. 58, No. 2. – P. 199–204.
- Zhang J. [et al.] Modelling of effective irradiation swelling for inert matrix fuels // Nuclear Engineering and Technology. – 2021. – Vol. 53, No. 8. – P. 2616–2628.
- Araya N., Madariaga J., Toledo M. Numerical modelling of a three-zone combustion for heavy fuel oil in inert porous media reactor // International Journal of Hydrogen Energy. – 2021. – Vol. 46, No. 43. – P. 22385–22396.
- Ivanov I.A. [et al]. Study of the Effect of Y2O3 Doping on the Resistance to Radiation Damage of CeO<sub>2</sub> Microparticles under Irradiation with Heavy Xe22+ Ions // Crystals. – 2021. – Vol. 11, No. 12. – P. 1459.
- Liu Y. [et al]. Irradiation response of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-ZrO<sub>2</sub> ceramic composite under He ion irradiation // Journal of the European Ceramic Society. – 2021. – Vol. 41, No. 4. – P. 2883–2891.
- Gurevich V. L., Tagantsev A.K. Intrinsic dielectric loss in crystals // Adv. Phys. – 1991. – Vol. 40 (6). – P. 719–767.
- Korneeva E.A., Ibrayeva A., van Vuuren A.J., Kurpaska L., Clozel M., Mulewska K., Zdorovets M. Nanoindentation testing of Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> irradiated with swift heavy ions // Journal of Nuclear Materials. – 2021. – Vol. 555. – P. 153120.
- Nikitina E.V., Karfidov E.A., Kazakovtseva N.A. Degradation of the Ceramics Based on MgO, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, or Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> in the LiCl–KCl Melt with (Ce, Nd, U) Cl3 Additives // Russian Metallurgy (Metally). 2021. Vol. 2021.2. P. 224–228.

# ҚАҚТАУ ТЕМПЕРАТУРАСЫНЫҢ ӨЗГЕРУІ КЕЗДЕ КОМПОЗИТТІК Al2O3-Si3N4 КЕРАМИКАЛАРЫНДАҒЫ ФАЗАЛЫҚ ТҮЗІЛУ ПРОЦЕСТЕРІН ЗЕРТТЕУ

# Д.Б. Боргеков<sup>1,2)</sup>, <u>А.Л. Козловский</u><sup>1,2)</sup>

## <sup>1)</sup> Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті КеАҚ, Астана, Қазақстан <sup>2)</sup> ҚР ЭМ Ядролық физика институты, Алматы, Қазақстан

Бұл жұмыстың мақсаты – қақтау температурасының 800–1500 °С диапазонында өзгеруі кезінде  $Al_2O_3$ -Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> керамикаларындағы фазалық түзілу процестерінің заңдылықтарын анықтау, сондай-ақ фазалық құрамның керамиканың беріктік қасиеттеріне әсерін анықтау. Композиттік керамиканың осы класына қызығушылық оларды дисперсті ядролық отынның инертті матрицалары үшін материалдар ретінде пайдалану мүмкіндігіне байланысты. Үлгілерді термиялық күйдіру нәтижесінде олардың фазалық құрамы мен динамикасының өзгеруін бағалау рентгендік фазалық талдау әдісін қолдана отырып жүргізілді. Талдау барысында келесі фазалық түрлендірулер анықталды: Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>  $\rightarrow$  Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-R  $\rightarrow$  Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-R/Al<sub>2</sub>SiO<sub>5</sub>  $\rightarrow$  Al<sub>2</sub>SiO<sub>5</sub>/SiO<sub>2</sub>, бұған сәйкес күйдіру температурасының өзгеруі күйдіру температурасының жоғарылауымен алюминий оксидінің полиморфты түрленуінің өзгеруіне, сондай-ақ күрделі Al<sub>2</sub>SiO<sub>5</sub> типті оксид фазасының түзілуіне әкеледі. Сонымен қатар, күйдіру температурасы 1400 °С-ден жоғары болған кезде кремний нитридінің ыдырау процестерімен және оны күйдіру кезінде ауамен әрекеттесіп кремний оксидіне айналуымен байланысты оның Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>  $\rightarrow$  SiO<sub>2</sub> түріне айналуы байқалады. Сондай-ақ, ұсынылған мәліметтерге сәйкес, керамиканы күйдірудің басты процестері фазалық арақатынасын айтарлықтай өзгертпестен үлгілерді құрылымдық реттеу процестері болып табылатындығы анықталды.

**Түйін сөздер**: Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> керамикалары, композиттер, фазалық ауысулар, беріктік, қаттылық, деструкцияға төзімділік.

# INVESTIGATION OF PHASE FORMATION PROCESSES IN COMPOSITE Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> CERAMICS WITH VARIATIONS OF SINTERING TEMPERATURE

D.B. Borgekov<sup>1,2)</sup>, <u>A.L. Kozlovskiy<sup>1,2)</sup></u>

<sup>1)</sup> L.N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, Kazakhstan <sup>2)</sup> Institute of Nuclear Physics ME RK, Almaty, Kazakhstan

The purpose of this work is to establish regularities in the processes of phase formation in Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> ceramics in the annealing temperature range from 800 to 1500 °C, as well as to determine the effect of the phase composition of ceramics on strength properties. Interest in this class of composite ceramics is due to the possibility of using them as materials for inert matrices of dispersed nuclear fuel. The evaluation of the phase composition as a result of thermal annealing of the samples was carried out using the method of X-ray phase analysis. In the course of the analysis, the following phase transformations were established: Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>  $\rightarrow$  Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-M/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-R  $\rightarrow$  Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-R/Al<sub>2</sub>SiO<sub>5</sub>  $\rightarrow$  Al<sub>2</sub>SiO<sub>5</sub>/SiO<sub>2</sub>, according to which a change in the annealing temperature leads to polymorphic transformations of aluminum oxide with an increase in the annealing temperature, as well as the formation of a complex oxide phase of the Al<sub>2</sub>SiO<sub>5</sub> type. At the same time, at an annealing temperature above 1400 °C, a transformation of the Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>  $\rightarrow$  SiO<sub>2</sub> type is observed, associated with the processes of decomposition of silicon nitride and its transformation into silicon oxide upon interaction with air during annealing. It was found that the primary processes during annealing of ceramics are the processes of structural ordering of samples, without a significant change in the phase ratio.

*Keywords:* Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> ceramics, composites, phase transformations, strength, hardness, fracture resistance.

## <u>https://doi.org/10.52676/1729-7885-2023-1-77-82</u> УДК 621.384.6:535.243.2

# СИСТЕМА ОПТИЧЕСКОЙ ДИАГНОСТИКИ НА УСКОРИТЕЛЕ INURA

#### М.И. Кайканов, Д.К. Наурузбаев, А.В. Тихонов, М.У. Хасенов

#### Назарбаев Университет, Школа естественных, социальных и гуманитарных наук, Астана, Казахстан

#### E-mail для контактов: mendykhan.khassenov@nu.edu.kz

Создана система вывода и транспортировки светового излучения из камеры облучения и защитного бокса ускорителя INURA. Свет за пределами защитного бокса регистрируется с помощью компактных спектрометров, фотоэлектронных умножителей, фотодетекторов в диапазоне от 300 нм до 2,1 мкм. В настоящее время ускоритель работает в режиме ускорения ионов, число решаемых задач должно возрасти при переводе в режим ускорения электронов. Система опробована при регистрации светового излучения из межэлектродного промежутка диодного узла. Зарегистрированы линии атома водорода, атома кислорода, связанные с разложением абсорбированных паров воды и разрядом по поверхности диэлектрика на аноде сильноточного диода ускорителя.

Ключевые слова: ускоритель, световое излучение, фотодетекторы, спектр, серия Бальмера.

## Введение

Мощный импульсный ионный ускоритель INURA [1] предназначен для проведения исследований в области модификации различных материалов (наноматериалы, тугоплавкие сплавы, высокотемпературные керамики и др.) [2–4]. Параметры ускорителя INURA: ускоряющее напряжение 150–400 кВ, длительность импульса тока пучка ≈100 нс, ток ионного пучка до 10 кА, импульсная плотность мощности ионного пучка на мишени до 0,1–0,2 ГВт/см<sup>2</sup>.

На ускорителе INURA планируется провести измерения спектральных и спектрально-временных параметров светового излучения в следующих исследованиях:

 а) измерение температуры мишени при облучении;

б) исследование плазменных и приэлектродных явлений в диодной камере;

в) исследование плазмохимических процессов при модификации мишеней мощным электронным пучком;

г) изучение люминесценции газов при возбуждении мощным электронным пучком, особенно в инфракрасном (ИК) диапазоне.

Эти исследования должны охватывать широкий спектральный диапазон от ультрафиолетовой до ближней инфракрасной области. В настоящее время ускоритель работает в режиме ускорения ионов. Реализация двух последних задач возможна при переходе на режим ускорения электронов.

Одной из важнейших задач является измерение температуры мишеней при облучении электронными и ионными пучками ускорителя. В [5, 6] был разработан быстродействующий многоканальный радиационный пирометр для экспериментов с теплым плотным веществом (WDM) с интенсивными пучками тяжелых ионов на ускорителе GSI. Пирометр способен измерять яркостные температуры от 1 500 К до 12 000 К на шести длинах волн в видимой и ближней инфракрасной частях спектра с временным разрешением 5 нс и пространственным разрешением в несколько микрометров. Температура образца определяется путем подгонки зарегистрированного теплового спектра по формуле Планка и выбранной модели коэффициента излучения. Рассматривались две модели коэффициента излучения. Рассматривались две модели коэффициента излучения: «серое тело», когда коэффициент излучения образца считали не зависящим от длины волн и, вторая, когда принималась линейная зависимость от длины волны. Многоволновый оптический пирометр с разложением света в спектр дифракционной решёткой и регистрацией стрик-камерой использовался для измерения температуры образцов на ускорителе NDCX-1 [7].

В большинстве случаев достаточно более простой двухволновой схемы [8]. Предполагается, что при сравнительно близких длинах волн эмиссионная способность мишени будет одинаковой,  $\varepsilon(\lambda_1) = \varepsilon(\lambda_2)$ . При регистрации света с помощью фотоэлектронного умножителя (ФЭУ) или фотодиода интенсивность будет пропорциональна числу фотонов N, тогда:

$$T = \frac{C_2}{\Lambda} \left[ \ln \left( N_1 \lambda_1^4 \right) - \ln \left( N_2 \lambda_2^4 \right) \right]^{-1}$$

где  $C_2 = hc/k$  – вторая пирометрическая постоян-

ная, 
$$\Lambda = \frac{\kappa_1 \kappa_2}{\lambda_1 - \lambda_2}$$
 – эффективная длина волны,  $h$  – по-

стоянная Планка, *k* – постоянная Больцмана, *c* – скорость света.

Спектры люминесценции газовых сред в ультрафиолетовой и видимой области под действием электронных и ионных пучков исследованы во многих работах [9, 10]. В то же время нет данных по инфракрасным спектрам газов при возбуждении пучками частиц или продуктами ядерных реакций. Такие данные важны с точки зрения выявления механизмов заселения уровней атомов при возбуждении ионизирующим излучением [11].

Измерения оптического излучения образцов внутри вакуумной камеры облучения были затруднены из-за рассеянного света при разряде в диодном узле. Система была опробована при исследовании светового излучения в межэлектродном промежутке диодного узла ускорителя. Дальнейшие исследования будут проведены при переводе установки в режим ускорения электронов.

## 1. Экспериментальная часть

Общая схема измерения показана на рисунке 1. Свет из диодной камеры или камеры облучения проходил через окно и фокусировался линзой (2) на вход волоконного световода (3) длиной 10 м (рисунок 2). Далее световой поток разветвляется по раздвоенному световоду длиной 2 м (4), часть потока поступает на вход компактного спектрометра (8). Вторая часть попадает на щель монохроматора (5) и временную зависимость светового излучения на выбранной длине волны можно регистрировать с помощью фотоэлектронного умножителя или фотодиода (6), сигнал с фотоприёмника записывается с помощью осциллографа (7).

Возможны другие сочетания регистрирующей аппаратуры (см. таблицу), свет с помощью раздвоенных световодов может делиться на большее число лучей.



1 – ускоритель INURA; 2 – окно и конденсорная линза; 3 – 10 м световод; 4 – раздвоенный световод; 5 – монохроматор; 6 – фотодетектор; 7 – осциллограф; 8 – компактный спектрометр; 9 – ноутбук; 10 – защитный бокс

Рисунок 1. Схема измерения оптического излучения



Рисунок 2. Вывод оптического излучения из вакуумной диодной камеры

Элемент	Модель, производитель	Параметры
	QE65Pro-abs, Ocean Optics	Спектральный диапазон 200–975 нм
компактныи спектрометр	NIRQuest 512-2.5, Ocean Optics	Спектральный диапазон 900–2500 нм
Осциллограф	DSO1024A, Keysight Technologies	Полоса пропускания 200 МГц, 4 канала
Монохроматор	DK-240, Spectral Products	Спектральный диапазон 180–3000 нм
Модуль ФЭУ	PDM04-9113-CN-A, ET Enterprises	Спектральный диапазон 280–850 нм, полоса пропускания 100 МГц
	DET025A, Thorlabs	Кремниевый фотодиод, спектральный диапазон 400–1100 нм, полоса пропускания 2 ГГц
Фотодетектор	DET01CFC, Thorlabs	InGaAs фотодиод, спектральный диапазон 800–1700 нм, полоса пропускания 1,2 ГГц
	PDA10D2	InGaAs фотодиод, спектральный диапазон 900–2600 нм, полоса пропускания 25 МГц
	84-UV-25, Ocean Insight	Диаметр 25,4 мм, фокусное расстояние 100 мм, спектральный диапазон 185–2500 нм
Линзы кварцевые	LA4078-ML, Ocean Optics	Диаметр 50,8 мм, фокусное расстояние 75 мм, спектральный диапазон 185–2100 нм
	74-UV, Ocean Insight	Диаметр 5 мм, фокусное расстояние 10 мм, спектральный диапазон 190–2500 нм
Charanaa	P600-10-UV-VIS, Ocean Insight	Длина 10 м, спектральный диапазон 300–1100 нм
Световоды	P600-10-VIS-NIR, Ocean Insight	Длина 10 м, спектральный диапазон 400–2100 нм
	QBIF600-UV-BX, Ocean Insight	Длина 2 м, спектральный диапазон 300–1100 нм
Световоды раздвоенные	QBIF600-VIS-BX, Ocean Insight	Длина 2 м, спектральный диапазон 400–2100 нм
Набор полосовых фильтров	Thorlabs	От 350 до 1600 нм с шириной полосы пропускания 10-12 нм, 9 фильтров
Источник света	Галогенная лампа HL-2000-Cal, Ocean Optics	Для калибровки спектральной чувствительности в диапазоне 360–1050 нм

Таблица. Элементы системы регистрации оптического излучения

Для измерений в вакуумной камере облучения световое излучение фокусировалось линзой 74-UV на световод PV600-1-VIS-NIR. Световоды PV600-1-VIS-NIR без оболочки предназначены для работы в вакууме. Далее свет выводился из камеры облучения через вакуумный оптический ввод VFT-600-VIS-16 и направлялся в систему транспортировки из защитного бокса. Измерения при регистрации света фотоэлектронным умножителем показали отсутствие заметной люминесценции кварца в линзе и световоде под действием рентгеновского излучения в камере. Также отсутствовало заметное наведённое поглощение в кварце после более 100 импульсов ускорителя (рисунок 3).



Рисунок 3. Спектры излучения галогенной лампы (1) и излучения лампы после прохождения через облученный световод (2)

На рисунке 4 показана система регистрации при исследовании светового излучения в межэлектродном промежутке. Свет регистрировался с помощью модуля ФЭУ PDM02-9113-CN, ФЭУ работал в токовом режиме с резистивной нагрузкой 105 Ом. Фотодиод был подключен к входу осциллографа с сопротивлением нагрузки 50 Ом. Сигналы полного тока диода ускорителя, ФЭУ, фотодиода регистрировались с помощью осциллографа DSO1024А. Использовался монохроматор DK-240 с тремя автоматически сменяемыми дифракционными решетками. Ширина щелей составляла 2 мм, что соответствует спектральной ширине ≈7 нм. Ширина щели и длина волны выставлялись с помощью ручного контроллера. Были проведены измерения на ожидаемых длинах волн линий атомарного водорода, атомарного кислорода, полосах молекулы азота и молекулярного иона азота. Также измерения проводились на ряде точек для определения непрерывного спектра излучения.



1 – модуль ФЭУ, 2 – InGaAs фотодетектор, 3 – контроллер монохроматора

Рисунок 4. Система регистрации при исследовании светового излучения

## 2. Излучение в межэлектродном промежутке

Для синхронизации сигналов с фотодетекторов с током пучка на вход осциллографа подавался импульс от полного тока диода (рисунок 5). Одновременная регистрация светового излучения и тока пучка невозможна, так как цилиндр Фарадея в этом случае должен устанавливаться на место образца под пучком ионов. Ток пучка возникает со сдвигом  $\approx$ 70 нс относительно импульса полного тока диода,, длительность тока пучка на полувысоте  $\approx$ 85 нс (см. рисунок 5). Запуск осциллографа от импульса тока диода позволяет также установить более чувствительные диапазоны измерения на каналах, регистрирующих сигналы фотодетекторов. При запуске от сигнала с ФЭУ этому препятствовал высокий уровень шума ФЭУ.



Рисунок 5. Осциллограммы тока пучка (1) и полного тока диода (2)

На рисунке 6 показана осциллограмма полного тока диода и светового излучения в межэлектродном промежутке, регистрируемого с помощью ФЭУ в области 280–850 нм. Световое излучение возникает практически одновременно с разрядом в межэлектродном промежутке, то есть полным током диода, максимальный сдвиг составил 40 нс.



Рисунок 6. Осциллограммы тока диода (1) и свечения в межэлектродном промежутке (2)

#### 2.1 Атомарные линии

Наиболее яркие наблюдавшиеся спектральные линии (рисунок 7) связаны с переходами серии Бальмера в атоме водорода (на 656,3, 486,1, 434,0 нм).



Рисунок 7. Осциллограммы излучения на линиях атома водорода: 656 нм (а), 486 нм (б) и 434 нм (в)

Эти линии соответствуют переходам np-2s и, возможно, nd-2p (где n=3, 4, 5, соответственно) атома водорода. Первый пик в излучении атома водорода на всех трёх линиях соответствует импульсу тока пучка.

На рисунке 8 показана осциллограмма излучения на линии атома кислорода 777 нм (3p-3s). Необходимо отметить низкую чувствительность ФЭУ в ИК-области спектра.



# 2.2 Молекулярные полосы и непрерывный спектр

Сигнал с ФЭУ на длинах волн 391,4 (полоса излучения молекулярного иона азота  $N_2^+$ ), 358 нм (вторая положительная полоса молекулы азота) не превышал уровня шума.

Максимум непрерывного излучения разряда приходится на 550 нм (рисунки 9, 10).



Рисунок 10. Осциллограммы излучения на длинах волн 530 нм (1) и 570 нм (2)

Осциллограммы, аналогичные полученным на 570 нм, зарегистрированы на  $\lambda$ =600 нм. Сигнал с ФЭУ на 700 и 800 нм не превышал уровень шума, однако чувствительность ФЭУ в этой области также сравнительно низкая.

#### Выводы

Создана система вывода и регистрации светового излучения из камеры облучения ускорителя INURA. Система позволяет зарегистрировать световой поток в диапазоне от 300 до 2100 нм. Показано отсутствие заметной люминесценции и заметного наведённого поглощения кварцевой линзы и кварцевой основы световодов в поле рентгеновского излучения в камере облучения.

В излучении межэлектродного промежутка диодного узла преобладают линии бальмеровской серии атома водорода. Также наблюдается характерная линия атома кислорода при 777 нм. Излучение полос молекулы азота и молекулярного иона азота N2<sup>+</sup> практически отсутствует. Таким образом, эмиссия связана, в основном, с наличием остаточного водяного пара в диодной камере, а также с плазмообразованием на поверхности анода, покрытого углеводородным диэлектриком, при эмиссии ионного пучка. Полоса ОН с максимумом при 308 нм, характерная для возбуждения паров воды, находится за пределами области пропускания оптических волокон VIS-NIR. Разложение водяного пара в разряде является источником протонов ускорителя. Непрерывный спектр с максимумом при 550 нм относительно слабый.

#### Благодарности

Работа выполнена в рамках проекта AP13067604, финансируемого Министерством Науки и высшего образования Республики Казахстан.

## ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES

- Kaikanov M., Baigarin K., Tikhonov A. et al. An Accelerator Facility for WDM, HEDP, and HIF Investigations in Nazarbayev University // J. Phys. Conf. Ser. – 2016. – V. 717, 012099. https://doi.org/10.1088/1742-6596/717/1/012099
- Kaikanov M., Amanzhulov B., Demeuova G., Akhtanova G., Bozheyev F., Kemelbay A., Tikhonov A. Modification of Silver Nanowire Coatings with Intense Pulsed Ion Beam for Transparent Heaters // Nanomaterials. 2020. V. 10. No. 11, 2153. https://doi.org/10.3390/nano10112153
- Kaikanov M., Kozlovskiy A.L., Abduvalov A. et al. Study of using pulsed beams to increase the radiation resistance of nitride ceramics to helium swelling // Appl. Phys. A. – 2019. – V. 125, 555. https://doi.org/10.1007/s00339-019-2857-5
- Abduvalov A., Kaikanov M., Atabaev T., Tikhonov A. Improving Photoelectrochemical Activity of Magnetron-Sputtered Double-Layer Tungsten Trioxide Photoanodes by Irradiation with Intense Pulsed Ion Beams // Nanomaterials. – 2022. – V. 12, 2639. https://doi.org/10.3390/nano12152639
- Ni P.A., Kulish M.I., Mintsev V. et al., Temperature measurement of warm-dense-matter generated by intense heavy-ion beams // *Laser and Particle Beams*. 2008. V. 26. P. 583–589. https://doi.org/10.1017/S0263034608000645

- 6. Ni P., Temperature measurement of high-energy-density matter generated by intense heavy ion beam // *Thesis*, Darmstadt, 2006, 87 p.
- Ni P.A., Bieniosek F.M., Henestroza E., Lidia S.M. A multi-wavelength streak-optical-pyrometer for warmdense matter experiments at NDCX-I and NDCX-II // *Nuclear Instruments and Methods A.* – 2014. – V. 733. – P. 12–17. https://www.sciencedirect.com/science/article/ pii/S0168900213007134
- Rakhman A., Blokland W. Non-contact surface temperature measurements of nanocrystalline diamond foil under intense ion beams // *Proc. of SPIE.* – 2020. - V. 11502, 115020D. https://doi.org/10.1117/12.2568927
- Ulrich A. Light emission from particle beam induced plasma: An overview // Laser and Particle Beams. 2012. V. 30. P. 199–205. https://doi.org/10.1017/S0263034611000838
- Gordienko Yu., Khasenov M., Batyrbekov E., Amrenov A., Samarkhanov K., Ponkratov Yu. Luminescence of Noble Gases and Their Mixtures Under Nanosecond Electron-Beam Excitation // Journal of Applied Spectroscopy. – 2018. - V. 85. – No. 4. – P. 600–604. https://doi.org/10.1007/s10812-018-0692-7
- Melnikov S.P., Sizov A.N., Sinyanskii A.A., Miley G.H. Lasers with Nuclear Pumping // Heidelberg:Springer, 2015. https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-319-08882-2

# INURA ҮДЕТКІШІНДЕГІ ОПТИКАЛЫҚ ДИАГНОСТИКА ЖҮЙЕСІ

## М.И. Кайканов, Д.К. Наурузбаев, А.В. Тихонов, М.У. Хасенов

## Назарбаев Университеті, Жаратылыстану, әлеуметтік және гуманитарлық ғылымдар мектебі. Астана, Қазақстан

Сәулелену камерасынан және INURA үдеткішінің қорғаныс қорабынан жарық сәулесін шығару және тасымалдау жүйесі құрылды. Қорғаныс қорабының сыртында жарық 300 нм-ден 2,1 мкм-ге дейінгі диапазондағы ықшам спектрометрлер, фотокөбейткіштер, фотодетекторлар көмегімен тіркеледі. Қазіргі уақытта үдеткіш иондық үдеу режимінде жұмыс істейді, электронды үдеу режиміне ауысқанда шешілетін мәселелердің саны артуы керек. Жүйе диодтық блоктың электродаралық саңылауынан жарық сәулеленуін тіркеуде сынақтан өтті. Сіңірілген су буының ыдырауымен және жоғары ток үдеткіш диодтың анодындағы диэлектрлік беттегі разрядпен байланысты сүтегі атомы мен оттегі атомының сызықтары тіркелді.

Түйін сөздер: үдеткіш, жарық сәулеленуі, фотодетекторлар, спектр, Бальмер сериясы.

# OPTICAL DIAGNOSTICS SYSTEM AT THE INURA ACCELERATOR

## M.I. Kaikanov, D.K. Nauruzbayev, A.V. Tikhonov, M.U. Khasenov

## Nazarbayev University, School of Sciences and Humanities, Astana, Kazakhstan

A system has been created for extracting and transporting light radiation from the irradiation chamber and the protective box of the INURA accelerator. Light outside the protective box is recorded using compact spectrometers, photomultipliers, photodetectors in the range from 300 nm to 2.1  $\mu$ m. At present, the accelerator operates in the ion acceleration mode; the number of problems to be solved should increase when switching to the electron acceleration mode. The system was tested in the registration of light radiation from the interelectrode gap of the diode assembly. Lines of a hydrogen atom and an oxygen atom associated with the decomposition of absorbed water vapor and the discharge over the dielectric surface at the anode of the high-current accelerator diode have been registered.

Keywords: accelerator, light emission, photodetectors, spectrum, Balmer series.

## <u>https://doi.org/10.52676/1729-7885-2023-1-83-87</u> УДК 621.039.5

# РАСЧЕТНЫЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ДАННЫЕ О ПРОФИЛЕ ЭНЕРГОВЫДЕЛЕНИЯ В ТВС РЕАКТОРА ИВГ.1М ПОСЛЕ СНИЖЕНИЯ ОБОГАЩЕНИЯ ТОПЛИВА

<u>Р.Р. Сабитова<sup>1,2)</sup></u>, Ю.А. Попов<sup>1)</sup>, Р.А. Иркимбеков<sup>1)</sup>, И.В. Прозорова<sup>1,2)</sup>, С.В. Беденко<sup>2</sup>

<sup>1)</sup> Филиал «Институт атомной энергии» РГП НЯЦ РК, Курчатов, Казахстан <sup>2)</sup> Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Томск, Россия

E-mail для контактов: sabitovar@nnc.kz

До ввода в эксплуатацию реактора ИВГ.1М с низкообогащенным урановым топливом на физическом и энергетическом пусках были проведены экспериментальные исследования характеристик реактора, которые должны подтвердить результаты предварительных расчетных исследований и работоспособность реактора. Данная статья посвящена исследованию аксиального и радиального профиля энерговыделения в топливных сборках реактора ИВГ.1М с помощью методов внутриреакторной дозиметрии. Результаты экспериментальных исследований приведены в сравнении с результатами нейтронно-физического моделирования. Полученные коэффициенты неравномерности энерговыделения могут быть использованы в дальнейших теплотехнических расчетах.

Ключевые слова: ИВГ.1М реактор, энерговыделение, распределение энерговыделения, активационный метод.

#### Введение

В рамках программы по нераспространению ядерного оружия исследовательский реактор ИВГ.1М (г. Курчатов, Казахстан) был переведен с высокообогащенного уранового топлива (90% по урану-235) на низкообогащенное (19,75% по урану-235). В результате конверсии топлива изменениям подверглись тепловыделяющие элементы реактора, сердечник которых в настоящее время представляет собой циркониевую матрицу с размещенными в ней нитями металлического урана [1].

После загрузки активной зоны реактора новым топливом осуществлялась экспериментальная оценка нейтронно-физических характеристик реактора. Необходимость данной оценки обусловлена возможностью отличия действительных параметров технологических каналов (геометрические размеры, химический и нуклидный составы) от проектных, а также от результатов нейтронно-физического моделирования.

В рамках настоящей работы в ходе физического пуска реактора ИВГ.1М методами внутриреакторной дозиметрии были исследованы поля энерговыделения в ТВС. Проведен сравнительный анализ экспериментальных данных с результатами моделирования [2–3].

Исследование полей энерговыделения в топливе реактора позволяет определить наиболее энергонапряженные участки ТВС и допустимую тепловую мощность реактора, что является важным критерием с точки зрения безопасной эксплуатации реактора.

## РЕАКТОР ИВГ.1М

Исследовательский реактор ИВГ.1М представляет собой водо-водяной тепловой реактор канального типа. На реакторе ИВГ.1М проводятся испытания различных типов ТВС и отдельных конструкционных материалов.

Активная зона реактора (рисунок 1) загружена тридцатью водоохлаждаемыми технологическими каналами (ВОТК), в составе которых находятся ТВС. ВОТК распределены по трем кольцевым рядам. Высота ТВС для первого и второго рядов ВОТК составляет 800 мм, для ТВС третьего ряда ВОТК – 600 мм. Органами управления реактором служат регулирующие барабаны. Отражателем является бериллий.



1, 2, 3 – ряды ВОТК; 4 – петлевой канал; 5 – стержни компенсации реактивности; 6 – регулирующие барабаны

Рисунок 1. Активная зона реактора ИВГ.1М

Методика и проведение исследований

На физическом пуске реактора, во время которого реактор работает на минимальных уровнях мощности, соответствующее малое энерговыделение можно измерить только методами, обладающими высокой чувствительностью. В связи с соответствием распределений плотности потока тепловых нейтронов и энерговыделения, наиболее подходящим методом исследования является активационный метод. Метод базируется на определении активности, наведенной нейтронами, в веществе топливного или активационного детектора. Преимуществами такого метода являются высокая эффективность регистрации нейтронов и возможность измерений во всем энергетическом интервале в диапазоне плотности потока нейтронов от 10<sup>3</sup> до 10<sup>15</sup> нейтр/(см<sup>2</sup>·с) [4–5].

Для исследования энергораспределения в ТВС реактора ИВГ.1М с низкообогащенным урановым топливом были использованы физические макеты топливных сборок для каждого ряда активной зоны. Для исследования полей энерговыделения по высоте ТВС вдоль физических макетов устанавливались медные проволочные активационные индикаторы. Для исследования радиального распределения энерговыделения в ТВС использовались топливные детекторы (фрагменты твэлов), размещенные в измерительной секции физического макета в виде решетки. Расположение топливных детекторов (выделены белой и красной краской) в измерительной секции представлено на рисунке 2.

Топливные детекторы предварительно были откалиброваны на относительное содержание урана-235. Калибровка осуществлялась относительным методом путем измерения гамма-излучения, обусловленного естественной радиоактивностью фрагментов твэлов. Измерения были проведены с помощью гамма-спектрометра с датчиком типа NaI(Tl).

Исследования полей энерговыделения проводились после облучения физических макетов в составе активной зоны реактора на пусках мощностью 400 Вт и длительностью 1000 секунд. Параметры облучения выбирались из условия достаточности для измерений набора активности продуктов деления и минимизации поправок на время выхода реактора на мощность и на время его останова.

Измерения активности (интенсивности регистрации гамма-излучения) облученных активационных и топливных детекторов проводились с помощью двух сцинтилляционных гамма-датчиков с размером кристалла 5×5 см. Использование второго датчика позволило исключить поправки на спад активности со временем.

При измерении активности активационных индикаторов регистрировался пик полного поглощения <sup>64</sup>Cu с энергией 511 кэВ. При измерении активности топливных детекторов спектрометры работали в режиме одноканальных радиометров. Рабочий диапазон регистрируемых энергий гамма-излучения составлял от 0,2 до 2 МэВ. В течение всех измерений периодически проводились измерения фона.

Распределение энерговыделения определялось относительным методом – отношением активности *i*-го образца к средней активности или к активности образца-репера. В качестве реперных образцов выбирались те, которые ближе всего расположены к центру TBC.

В случае определения распределения энерговыделения по радиусу ТВС дополнительно использовалась расчетная программа ENREDI [3], позволившая определить величину энерговыделения в твэлах, где не проводились измерения.

Процедура выполнения измерений и алгоритм вычислений обеспечивают получение значений энерговыделения с относительной погрешностью, не превышающей 5% при доверительной вероятности 0,95.



Рисунок 2. Измерительная секция физического макета

Нейтронно-физические расчеты полей энерговыделения в реакторе ИВГ.1М были проведены с помощью программы MCNP5, относящейся к числу универсальных программ для решения задач переноса излучения в произвольной трехмерной геометрии с библиотеками констант ENDF/B-5,6.

Расчетная модель реактора ИВГ.1М [6] для программы MCNP5 максимально приближена к существующей конструкции реактора: задана реальная трехмерная геометрия расположения конструкционных материалов и твэлов.

Нейтронно-физический расчет был проведен при следующей конфигурации реактора:

 активная зона реактора состояла из 29 ВОТК и 1 физического макета;

 температура элементов конструкции активной зоны реактора принималась равной 300 К.

## Результаты и обсуждение

На рисунке 3 представлено высотное распределение энерговыделения в ТВС реактора ИВГ.1М, полученное экспериментально, в сравнении с результатами нейтронно-физического расчета. Расчетные данные были получены с помощью кода MCNP5 и модели реактора ИВГ.1М с топливом низкого обогащения.

Как видно из рисунка, кривые энергораспределения по высоте ТВС, полученные экспериментальным путем для каждого из трех рядов ВОТК, практически совпадают в пределах погрешности с результатами моделирования в диапазоне высот от 0 до 600 мм. Для первого и второго рядов ВОТК наблюдается расхождение данных в диапазоне от 600 до 800 мм, что, скорее всего, связано с различием расчетной конфигурации реактора (температура реактора, уровень воды в канале физического макета).

Аксиальный коэффициент неравномерности энерговыделения для ТВС первого и второго рядов ВОТК, полученный экспериментально, составил 1,59, для ТВС третьего ряда – 1,28.

На рисунке 4 представлено сравнение экспериментальных и расчетных данных по распределению энерговыделения по радиусу ТВС. Кривые энергораспределения представлены для сечения, проходящего через оси реактора и ТВС (или физического макета) в направлении от центра активной зоны к периферии. Максимальное расхождение экспериментальных и расчетных значений энерговыделения в 7% отмечается в ТВС третьего ряда ВОТК. В целом, экспериментальные кривые в пределах погрешности согласуются с расчетными данными, что говорит о достоверности расчетной модели реактора.

По результатам экспериментальных исследований радиальный коэффициент неравномерности энерговыделения для ТВС первого, второго и третьего рядов ВОТК составил 1,52, 1,55 и 1,37 соответственно. Данные коэффициенты были определены для самых энергонапряженных твэлов на основании картограмм полей энерговыделения, полученных с помощью ENREDI.



Рисунок 3. Распределение энерговыделения по высоте ТВС



Рисунок 4. Распределение энерговыделения по радиусу ТВС

## Заключение

С помощью физических макетов ТВС ВОТК и активационного метода на этапе физического пуска были проведены исследования полей энерговыделения в топливе с низким урановым обогащением реактора ИВГ.1М. Полученные экспериментальные данные в целом согласуются с результатами предварительного нейтронно-физического моделирования, что говорит о достоверности используемой модели реактора.

Для аксиального распределения в диапазоне 600– 800 мм имеются расхождения расчетных и экспериментальных данных, связанных с отличием некоторых параметров реактора, заданных в модели реактора. Данное расхождение следует проверить проведением дополнительных нейтронно-физических расчетов с уточненной конфигурацией реактора.

Полученные в результате исследований коэффициенты неравномерности энерговыделения для каждого ряда технологических каналов могут быть использованы при расчетах тепловой нагрузки реактора ИВГ.1М, а также при планировании облучательных экспериментов.

## Благодарности

Работа поддержана Министерством образования и Науки Республики Казахстан (грантовый проект № АР09259736).

### Литература

- Zaytsev D.A., Repnikov V.M., Soldatkin D.M., Solntsev V.A. Studies of behavior of the fuel compound based on the U-Zr micro-heterogeneous quasialloy during cyclic thermal tests // Journal of Physics: Conference Series. – 2017. – Vol. 891(1). https://doi.org/10.1088/1742-6596/ 891/1/012181
- Жагипарова Л.К., Вурим А.Д., Котов В.М., Пахниц А.В., Иркимбеков Р.А., Байгожина А.А., Мурзагалиева

А.А., Витюк Г.А. Моделирование реактора ИВГ.1М // Вестник НЯЦ РК. – 2017. – Вып. 3. – С. 59–64.

- R.R. Sabitova, I.V. Prozorova, R.A. Irkimbekov, Yu.A. Popov, S.V. Bedenko, A.A. Prozorov, A.K. Mukhamediyev Methods to study power density distribution in the IVG.1M research reactor after conversion // Applied Radiation and Isotopes. – 2022. – Vol. 185, 110259.
- Казанский Ю.А., Матусевич Е.С. Экспериментальные методы физики реакторов: Учеб. пособие для вузов – М.: Энергоатомиздат. – 1984. – 272 с.
- Ломакин С.С. Ядерно-физические методы диагностики и контроля активных зон реакторов АЭС: Учеб. пособие для вузов. – М.: Энергоатомиздат. – 1986. – 120 с.
- Иркимбеков Р.А., Жагипарова Л.К., Котов В.М., Вурим А.Д., Гныря В.С. Нейтронно-физическая модель реактора ИВГ.1М: разработка и верификация по критическому состоянию // Атомная энергия. – 2019. – Том 127, №2. – С. 63–69.

# REFERENCES

- Zaytsev D.A., Repnikov V.M., Soldatkin D.M., Solntsev V.A. Studies of behavior of the fuel compound based on the U-Zr micro-heterogeneous quasialloy during cyclic thermal tests // Journal of Physics: Conference Series. – 2017. – Vol. 891(1). https://doi.org/10.1088/1742-6596/ 891/1/012181
- Zhagiparova L.K., Vurim A.D., Kotov V.M., Pakhnits A.V., Irkimbekov R.A., Baygozhina A.A., Murzagalieva A.A., Vityuk G.A. Modelirovanie reaktora IVG.1M // Vestnik NYaTs RK. – 2017. – Issue 3. – P.59-64.
- R.R. Sabitova, I.V. Prozorova, R.A. Irkimbekov, Yu.A. Popov, S.V. Bedenko, A.A. Prozorov, A.K. Mukhamediyev Methods to study power density distribution in the IVG.1M research reactor after conversion // Applied Radiation and Isotopes. – 2022. – Vol. 185, 110259.
- Kazanskiy Yu.A., Matusevich E.S. Eksperimental'nye metody fiziki reaktorov: Ucheb. posobie dlya vuzov – Moscow: Energoatomizdat. – 1984. – 272 p.

- Lomakin S.S. Yaderno-fizicheskie metody diagnostiki i kontrolya aktivnykh zon reaktorov AES: Ucheb. posobie dlya vuzov. – Moscow: Energoatomizdat. – 1986. – 120 p.
- 6. Irkimbekov R.A., Zhagiparova L.K., Kotov V.M., Vurim A.D., Gnyrya V.S. Neytronno-fizicheskaya model'

reaktora IVG.1M: razrabotka i verifikatsiya po kriticheskomu sostoyaniyu // Atomnaya energiya. – 2019. – Tom 127, No. 2. – P. 63–69.

# ОТЫНДЫ БАЙЫТУ ТӨМЕНДЕТІЛГЕННЕН КЕЙІН ИВГ.1М РЕАКТОРЫНЫҢ ЖБҚ-да ЭНЕРГИЯ БӨЛУ ПРОФИЛІ ТУРАЛЫ ЕСЕПТІК ЖӘНЕ ЭКСПЕРИМЕНТТІК ДЕРЕКТЕР

<u>Р.Р. Сабитова<sup>1,2)</sup>, Ю.А. Попов<sup>1)</sup>, Р.А. Иркимбеков<sup>1)</sup>, И.В. Прозорова<sup>1,2)</sup>, С.В. Беденко<sup>2)</sup></u>

<sup>1)</sup> КР ҰЯО РМК «Атом энергиясы институты» филиалы, Курчатов, Қазақстан <sup>2)</sup> Ұлттық зерттеу Томск политехникалық университеті, Томск, Ресей

Төмен байытылған уран отынды ИВГ.1М реакторын пайдалануға бергенге дейін физикалық және энергетикалық іске қосуларда реактордың сипаттамаларына эксперименттік зерттеулер жүргізілді, олар алдын ала есептік зерттеулердің нәтижелері мен реактордың жұмысқа жарамдылығын растауы тиіс. Бұл мақала реакторішілік дозиметрия әдісінің көмегімен алынған, ИВГ.1М реакторының отын құрамаларындағы энергия бөлудің аксиалды және радиалды профилін зерттеуге арналған. Эксперименттік зерттеулердің нәтижелері нейтрондық-физикалық модельдеу нәтижелерімен салыстырылды. Алынған энергия бөлудің бірқалыпсыздық коэффициенттері одан әрі жылу-техникалық есептеулерде пайдаланылуы мүмкін.

Түйін сөздер: ИВГ.1М реакторы, энергия бөлу, энергия бөлуді тарату, белсендіргіш әдіс.

# CALCULATED AND EXPERIMENTAL DATA ON ENERGY RELEASE PROFILE IN THE FUEL ASSEMBLY OF THE IVG.1M REACTOR AFTER FUEL ENRICHMENT REDUCTION

R.R. Sabitova<sup>1,2)</sup>, Yu.A. Popov<sup>1)</sup>, R.A. Irkimbekov<sup>1)</sup>, I.V. Prozorova<sup>1,2)</sup>, S.V. Bedenko<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup> RSE NNC RK Branch "Institute of Atomic Energy", Kurchatov, Kazakhstan <sup>2)</sup> National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russia

Prior to the commissioning of the IVG.1M reactor with low-enriched uranium fuel, experimental studies of reactor characteristics were carried out on physical and energy start-ups, which should confirm the results of preliminary computational studies and the operability of the reactor. This article is devoted to the study of the axial and radial energy release profile in the IVG.M reactor fuel assemblies using in-reactor dosimetry techniques. The experimental results are compared with the results of neutron-physical simulations. The obtained energy release irregularity coefficients can be used in further thermo-technical calculations.

Keywords: IVG.1M reactor, energy release, energy release distribution, activation method.

## <u>https://doi.org/10.52676/1729-7885-2023-1-88-96</u> УДК 581.5:546.11.027\*3:539.16 (574.41)

# ИЗУЧЕНИЕ РАСТИТЕЛЬНОГО ПОКРОВА И СОДЕРЖАНИЯ В НЕМ ТРИТИЯ НА ОБЪЕКТЕ «ЛАЗУРИТ» СЕМИПАЛАТИНСКОГО ИСПЫТАТЕЛЬНОГО ПОЛИГОНА

<u>Н.В. Ларионова<sup>1</sup></u>, П.Е. Кривицкий<sup>1</sup>, <u>Б.М. Султанова<sup>2</sup></u>, В.В. Полевик<sup>3</sup>, Л.В. Тимонова<sup>1</sup>, С.Б. Субботин<sup>1</sup>, Л.Ф. Субботина<sup>1</sup>, М.Т. Абишева<sup>1</sup>, В.Н. Монаенко<sup>1</sup>, А.В. Топорова<sup>1</sup>, А.О. Айдарханов<sup>1</sup>

Филиал «Институт радиационной безопасности и экологии» РГП НЯЦ РК, Курчатов, Казахстан
 <sup>2)</sup> Институт ботаники и фитоинтродукции, Алматы, Казахстан
 <sup>3)</sup> НАО «Университет имени Шакарима города Семей», Семей, Казахстан

E-mail для контактов: larionova@nnc.kz

В статье представлена характеристика растительного покрова объекта «Лазурит», в том числе содержание в нем радионуклида трития (<sup>3</sup>H): в свободной воде растений (TCB) и их органической составляющей (ОСТ). Выделено 5 основных типов экосистем: экосистемы низкогорий, высоких мелкосопочников, низких мелкосопочников, делювиально-пролювиальных и аллювиальных равнин. Установлено, что содержание ОСТ в растительном покрове на исследуемой территории незначительно и в абсолютном большинстве случаев находится ниже предела обнаружения используемого аппаратурно-методического обеспечения. Установленные количественные значения TCB и ОСТ в среднем составляют от 6 до 81 Бк/кг и от <10 до 37 Бк/кг, соответственно, с максимумом близ приустьевой площадки скважины P-1 (TCB – 29000±3000 Бк/кг, ОСТ – 14000±2000 Бк/кг). При этом отношение OCT/TCB (0,8) указывает на наличие современного источника поступления <sup>3</sup>H в растения.

Ключевые слова: СИП, растительный покров, тритий (<sup>3</sup>H).

#### Введение

Тритий (<sup>3</sup>H) радиоактивный изотоп водорода с массовым числом 3, чистый β-излучатель с периодом полураспада 12,4 года, образуется в верхних слоях атмосферы в результате взаимодействия космического излучения с ядрами атомов азота, кислорода, аргона и др., а также в литосфере и гидросфере при взаимодействии нейронов с литием земной коры [1]. В настоящее время в окружающей среде присутствует <sup>3</sup>Н как естественного, так и искусственного происхождения. С началом проведения ядерных и термоядерных испытаний в атмосферу Земли было введено количество <sup>3</sup>Н более чем в 60-190 раз превысившее его естественный уровень [2]. Значительная доля <sup>3</sup>Н наработана во время проведения ядерных испытаний на территории бывшего Семипалатинского испытательного полигона (СИП).

Работы по изучению <sup>3</sup>Н на СИП на сегодняшний день охватывают различные объекты окружающей среды. Так, <sup>3</sup>Н был исследован как индикатор мест проведения ядерных испытаний [3] и для оценки загрязнения грунтовых вод по его содержанию в растительном покрове [4], отдельные исследования были посвящены содержанию <sup>3</sup>Н в воздухе [5], почвах [6-9], растительном покрове и растениеводческой продукции [10-11], а также был исследован вопрос влияния <sup>3</sup>Н на морфо-анатомическую структуру растений [12]. Несмотря на многочисленность проведенных исследований, территория СИП с точки зрения <sup>3</sup>Н, до сих пор представляет собой особый интерес, так как его концентрации на отдельных участках превышают уровень радиоактивных отходов. Целью данного исследования стало изучение растительного покрова, а также содержания в нем радионуклида <sup>3</sup>Н на территории объекта «Лазурит», как интегрального показателя его наличия в сопряженных природных средах на данной территории.

Взрыв «Лазурит» в скважине Р-1, произведенный 07.12.1974 г. на СИП в урочище Муржик близ границы площадки «Сары-Узень» (Рисунок 1) стал вторым и последним взрывом на вспучивание грунта. Ядерный заряд мощностью 1,7 кт был размещен на склоне горы крутизной 20° в породах кварцита и кремнистых сланцев. Заложен заряд был на глубине 75 м по вертикали, что соответствовало расстоянию 70 м от поверхности склона. Целью эксперимента «Лазурит» было вспучивание почвы с последующим соскальзыванием образовавшегося купола вниз и образованием плотины. После взрыва образовался куполообразный навал раздробленной породы с диаметром в основании 200 м и высотой 14 м. Уровни радиации в момент и после проведения этого взрыва были в 30-40 раз ниже, чем при взрывах на выброс грунта. В настоящее время уровни гамма-излучения на навале грунта и вблизи него не превышают фоновых значений. Р1 объекта «Лазурит» – скважина без поверхностного радиоактивного загрязнения и относится к испытаниям, в результате которых весь массив продуктов взрыва остается под землей [13]. Целостная информация о наличии на территории данного объекта радионуклида <sup>3</sup>Н отсутствует.



Рисунок 1. Расположение объекта «Лазурит» на территории СИП, точки отбора проб растений и распределение геоботанических контуров

## Материалы и методы исследования

Для оценки пространственного распределения <sup>3</sup>Н в растительном покрове объекта «Лазурит» было заложено 55 исследовательских площадок по сети 1×1 км (точки отбора проб №№ 1-55). Для более детального исследования территории, непосредственно прилегающей к скважине Р1 объекта «Лазурит», 17 площадок (точки №№ 56-72) было дополнительно заложено близ ее оголовка с учетом элементов рельефа – в низинах, на склонах (рисунок 1). Измерения радиационных параметров – плотности потока β-частиц и мощности эквивалентной дозы (МЭД) – необходимые для первичной оценки наличия радиоактивного загрязнения на исследуемой территории, выполнялись при проведении экспедиционных работ в соответствии со стандартными методиками [14]. Изучение растительного покрова исследуемой территории проводилось посредством геоботанического описания с выделением основных типов растительности, растительных сообществ и видового состава растений [15]. В качестве основного исследуемого вида растений выбрана полынь (Artemisia gracilescens), в случае ее отсутствия отобран ковыль (Stipa capillata). Отбор 55 проб растений по сети 1×1 км проводился в ранний весенний период (начало марта), отбиралась наземная часть прошлого вегетационного периода. Отбор 17 проб проводился на основании результатов анализа, полученных для данных 55

проб растений, с учетом элементов рельефа в летний период (конец июня), отбирался прирост текущего года. Всего отобрано 72 пробы растений. Масса каждой пробы составляла 200–300 г. Все образцы растительности были запечатаны в двойные полиэтиленовые пакеты (чтобы свести к минимуму контакт между образцом и окружающим воздухом) и затем заморожены.

Содержание радионуклида <sup>3</sup>Н в растениях определялось в свободной воде (ТСВ) и органической составляющей (ОСТ). Выделение свободной воды из растительных образцов для измерения активности ТСВ производили посредством специальной установки [16]. Для этого образцы растений помещались на дно специального прозрачного контейнера, имеющего крышку в виде охлаждающего сосуда. В качестве охлаждающей жидкости использовалась холодная вода. При естественном испарении воды обратная сторона поверхности крышки охлаждалась, что позволяло собрать испарившуюся из проб растительности влагу (свободную воду), которая по своей сути является конденсатом. При этом объем конденсата в среднем составлял 10-15 мл. Свободная вода была получена только для 17 проб растений прироста текущего года. После извлечения свободной воды пробы высушивали до постоянной массы и сжигали на установке «Sample Oxidizer» PerkinElmer, США. Масса сжигаемого образца составляла 1-2 г.



Рисунок 2. Объект «Лазурит» (фото Р.А. Нефедова)

В полученных образцах измеряли удельную активность <sup>3</sup>H методом жидкостно-сцинтилляционной спектрометрии с использованием спектрометра «QUANTULUS 1220» (Perkin Elmer, США) [17]. Предварительно перед измерением пробы фильтровали для удаления механических примесей, затем отбирали аликвоту объёмом 3 мл в пластиковую виалу объёмом 20 мл и добавляли сцинтилляционный коктейль Ultima Gold LLT для природных образцов (эффективность регистрации для <sup>3</sup>H в диапазоне 0– 18 кэВ порядка 60%) в пропорции 1:4 (отношение «образец – сцинтиллятор»). Время измерения составляло не менее 120 мин, обработку бета-спектров и расчёт удельной активности <sup>3</sup>H проводили с использованием программы «Quanta Smart».

Для создания схем распределения <sup>3</sup>Н в растительном покрове применялся программный комплекс ArcGIS for Desktop (ГИС-платформа). Для визуализации точечных данных использовался метод представления значками с применением цветовой дифференциация, построенной по принципу равнораспределения. Цветовая дифференциация была подобрана таким образом, чтобы все оттенки цветов в полной мере характеризовали отображаемое явление: от светлых тонов (светло-зеленых), которые символизируют низкие значения удельной активности <sup>3</sup>Н в растительном покрове, до темных тонов (темно-красный и фиолетовый), которые отмечают высокие значения.

# Результаты и обсуждение

Измерения радиометрических параметров показали, что плотность потока  $\beta$ -частиц на исследуемой территории составляет <0,10 част/(мин·см<sup>2</sup>), мощность эквивалентной дозы гамма-излучения на поверхности почвы в среднем варьирует в пределах от 0,10 до 0,12 мкЗв/ч.

Исследуемая территория представляет собой участок низкогорного массива Муржик (рисунок 2). Пространственное распределение и флористический состав сообществ тесно связан с конкретными условиями среды. Всего на исследуемой территории выделено 5 основных экосистем: экосистемы низкогорий – A, B, C, экосистемы высоких мелкосопочников – D, Е, экосистемы низких мелкосопочников – F, экосистемы делювиально-пролювиальных равнин – G, H и экосистемы аллювиальных равнин – K, L (рисунок 1).

Экосистемы низкогорий представлены серией сообществ: петрофитноразнотравных (Orostachys spinosa, Sedum hybridum, Patrinia intermedia, Gypsophila patrinii, Veronica pinnata, Potentilla acaulis, Aretemisia obtusiloba, A. latifolia) в трещинах с мелкоземом; петрофитнокустарниковых (Rosa spinosissima, Spiraea trilobata, Lonicera microphylla, Cotoneaster melanocarpa, Pentaphylloides parvifolia, Berberis sibirica) на дресвянистых участках гранитных плит; можжевеловых (Juniperus sabina) на крупнокаменистых осыпях на склонах гребней хребтов. Также совокупностью серий сообществ: разнотравно-осоково-злаковых (Helictotrichon desertorum, Stipa kirghisorum, Festuca valesiaca, Carex pediformis, Thalictrum foetidium, Bupleurum aureum, Chamaerodos erecta, Pulsatilla patens) на малоразвитых сильно щебнистых каштановых почвах северных склонов хребтов; злаково-разнотравных (Fragaria viridis, Onosma simplicissimum, Diantus acicularis, Silene suffrutescens, Hieracium echioides, Papaver tenellum, Veronica spuria, Artemisia latifolia, A. rupestris, Festuca valesiaca, Stipa capillata, Agropyron cristatum) с участием кустарников (Spiraea trilobata, S. hypericifolia, Caragana pumila, Lonicera microphylla) на малоразвитых сильно щебнистых каштановых почвах южных склонов хребтов; в сочетании с серией: петрофитноразнотравно-кустарниковых (Pentaphylloides floribunda, Rosa spinosissima, Spiraea trilobata, Cotoneaster oliganthus, Berberis sibirica, Artemisia obtusiloba, Orostachys spinosa, Ziziphora clinopodioides, Thymus serpyllum, Gypsophila patrinii) и можжевеловых (Juniperus sabina), сообществ на выходах гранитных плит; группировок с доминированием Festuca valesiaca, Stipa kirghisorum, Cleistogenes squarrosa, Carex pediformis, Artemisia frigida, Artemisia latifolia, Thymus serpyllum, Ziziphora clinopodioides, Veronica incana, Ephedra distachya на нарушенных участках. А также серией сообществ: кустарниково-полынно-петрофитноразнотравных (Potentilla acaulis, Patrinia intermedia, Orostachys spinosa, Sedum hybridum, Gypsophila patrinii, Artemisia frigida, A. obtusiloba, Caragana pumila, Spiraea hypericifolia) на каменистых обнажениях; осоково-караганово-холоднополынно-дерновиннозлаковых (Festuca valesiaca, Helictotrichon desertorum, Cleistogenes squarrosa, Artemisia frigida, Caragana pumila, Carex pediformis) на дресвянистых участках; полынно-типчаково-ковыльных (Stipa capillata, S. kirghisorum, Festuca valesiaca, Artemisia marshalliana, A. frigida) с участием кустарников (Caragana pumila, Spiraea hypericifolia) и разнотравья (Galium verum, Phlomis tuberosa, Leonurus glaucescens, Dianthus leptopetalis) на неполноразвитых щебнистых каштановых почвах по склонам хребтов.

Экосистемы высоких мелкосопочников представлены серией сообществ: петрофитноразнотравно-кустарниковых Caragana pumila, C. frutex, Spiraea hypericifolia, Atraphaxis frutescens, Orostachys spinosa, Sedum hybridum, Ephedra distachya, Ajania fruticulosa по каменистым обнажениям, злаково-петрофитноразнотравных (Gypsophila patrinii, Goniolimon speciosum, Onosma tincthorum, Veronica incana, Hyssopus macranthus, Festuca valesiaca, Stipa capillata, Koeleria cristata) на дресвянистых участках, караганово-типчаково-холоднополынных (Artemisia frigida, Festuca valesiaca, Caragana pumila) на сильно щебнистых участках вершин и склонов пологоувалистого мелкосопочника, единичными растениями и разреженными группипровками с доминированием Festuca valesiaca, Koeleria cristata, Stipa capillata, Caragana pumila, C. frutex, Hyssopus macranthus, Thymus serphyllum, Onosma tincthorum, Veronica incana, Goniolimon speciosum, Ephedra distachva, Artemisia scoparia, A. Dracunculus, Berteroa incana на нарушенных участках. А также группой сообществ на защебненных каштановых почвах склонов и шлейфов пологоувалистого мелкосопочника: полынно-типчаково-тырсовых (Stipa capillata, Festuca valesiaca, Artemisia frigida, A. Marschalliana) с участием Caragana pumila, Spiraea hypericifolia; кустарниково-полынно-дерновиннозлаковых (Stipa capillata, Festuca valesiaca, Aremisia frigida, A. marschalliana, Caragana pumila, Spiraea hypericifolia) с участием Phlomis tuberosa, Galium ruthenicum, Gypsophila paniculata; полынно-типчаково-тырсовых (Stipa capillata, Festuca valesiaca,

Artemisia frigida, A. marschalliana), иногда с участием Ceratoides papposa; группировок с Aremisia austriaca, Eringium planum, Gypsophila paniculata, Acroptylon repens, Chenopodium urbicum, Psathyrostachis juncea, Ceratocarpus arenarius на нарушенных участках.

Экосистемы низких мелкосопочников представлены серией сообществ: петрофитных (Orostachys spinosa, Patrinia intermedia, Potentilla acaulus, Veronica pinnata) на выходах коренных пород, компактнополынно-типчаково-ковылково-тырсовых (Stipa capillata, S. lessingiana, Festuca valesiaca, Artemisia compacta) на светло-каштановых щебнистых неполноразвитых почвах, полынно-типчаково-тырсиковых (Stipa sareptana, Festuca valesiaca, Artemisia gracilescens, A. compacta) на светло-каштановых щебнистых почвах в комплексе: тасбиюргуново-биюргуново-полынными (Artemisia gracilescens, A. pauciflora, Anabasis salsa, Nanophyton erinaceum) с участием Limonium suffruticosum на светло-каштановых солонцеватых почвах проценозы с доминированием Artemisia albida, A. nitrosa, Bassia sedoides, Axyris hybrida, Salsola collina, Halogeton glomeratus на нарушенных участках.

Экосистемы делювиально-пролювиальных равнин включают группы сообществ: холоднополыннотипчаково-тырсовых (Stipa capillata, Festuca valesiaca, Artemisia frigida, Galatella tatarica, Ephedra distachya) степи, иногда с участием караганы (Caragana pumila) и таволги (Spiraea hypericifolia) на каштановых щебнистых почвах обширных межсопочных равнин; маршалловополынно-типчаково-тырсовых (Stipa capillata, Festuca valesiaca, Artemisia marschalliana); ковылково-типчаково-маршалловополынных (Artemisia marschalliana, A. austriaca, Festuca valesiaca, Stipa lessingiana, S. capillata, Koeleria cristata, Hultemia persica) на легкосуглинистых светло-каштановых почвах иногда в комплексе тонковатополынно-типчаково-тырсовых (Stipa capillata, Festuca valesiaca, Artemisia gracilescens) с участием Anabasis salsa, Nanophyton erinaceum на светло-каштановых солонцеватых почвах обширных межсопочных равнин и проценозы с доминированием Leymus paboanus, Artemisia austriaca, Psathyrostachis juncea, Thlaspi arvense, Lepidium ruderale, Polygonum aviculare, Kochia scoparia, Chenopodium acuminatum, Ch. album на нарушенных участках.

Экосистемы аллювиальных равнин включают древнеаллювиальные и современные аллювиальные. Древнеаллювиальные равнины: сублессингиановополынно-типчаково-ковыльные (*Stipa lessingiana*, *Festuca valesiaca*, *Artemisia sublessingiana*) степи на карбонатных светло-каштановых почвах, иногда в комплексе ломкоколосниково-тонковатополынными (*Artemisia gracilescens*, *Psathyrostachys juncea*) на солонцеватых светло-каштановых почвах древнеаллювиальной равнины. Экосистемы современных аллювиальных равнин включают ряд сообществ: рогозово-клубнекамышевых (*Bolboschoenus planiculmis*, *Ty*- *pha laxmannii*)  $\rightarrow$  сытево-камышевых (*Cyperus fuscus*, *Scirpus lacustris*) → разнотравно-тростниковых (Phragmites australis, Lactuca tatarica, Glaux mari*tima*)  $\rightarrow$  гигрофитноразнотравных (*Crypsis aculeata*, Juncus gerardii, Eleocharis acicularis, Brachyactis ciliata, Chenopodium rubrum) → подорожниково-однолетнесолянковых (Salicornia europaea, Suaeda prostrata, Chenopodium botrys, Plantago tenuiflora, P. Ma*ritima*)  $\rightarrow$  разнотравно-тростниковых (*Phragmites*) australis, Lactuca tatarica, Saussurea amara) → галофитных разнотравно-злаковых (Aeluropus littoralis, Puccinellia dolicholepis, Limonium gmelinii, Erigeron *canadensis*)  $\rightarrow$  разнотравно-злаковых (*Hordeum bre*visubulatum, Leymus angustus, Inula caspica, Glycyr*rhiza uralensis*)  $\rightarrow$  чингилово-чиевых (Achnatherum splendens, Halimodendron halodendron),  $\rightarrow \kappa a M \phi o poc$ мово-кокпековых (Atriplex cana, Camphorosma monspeliaca).

Содержание ОСТ в растениях, отобранных в ранний весенний период по сети  $1 \times 1$  км, представлено в таблице.

Точка отбора	Удельная активность <sup>з</sup> Н, кБк/кг	Точка отбора	Удельная активность <sup>з</sup> Н, кБк/кг
1	<0,02	29	<0,02
2	<0,03	30	<0,08
3	<0,05	31	0,02±0,003
4	<0,02	32	<0,02
5	<0,02	33	<0,02
6	<0,02	34	<0,02
7	<0,02	35	<0,03
8	<0,02	36	<0,02
9	0,02±0,003	37	<0,03
10	<0,02	38	<0,02
11	<0,02	39	<0,02
12	<0,02	40	<0,02
13	<0,02	41	<0,02
14	<0,03	42	<0,03
15	<0,05	43	<0,03
16	<0,02	44	<0,03
17	<0,02	45	<0,03
18	<0,02	46	<0,02
19	<0,02	47	<0,02
20	<0,03	48	<0,02
21	<0,02	49	<0,02
22	<0,02	50	<0,01
23	<0,02	51	<0,03
24	<0,04	52	<0,02
25	<0,02	53	<0,02
26	<0,03	54	<0,03
27	<0,02	55	<0,02
28	<0,02		

Таблица. Содержание ОСТ в растительном покрове объекта «Лазурит»

Как видно из таблицы, содержание ОСТ в растительном покрове на территории объекта «Лазурит» оказалось ниже предела обнаружения используемого аппаратурно-методического обеспечения.

Количественные значения удельной активности <sup>3</sup>Н в растительном покрове установлены лишь в непосредственной близости от скважины P-1 для экосистем низкогорий с преобладанием разнотравно-осоково-злаковых и злаково-разнотравных растительных сообществ на малоразвитых сильно щебнистых каштановых почвах в сочетании с петрофитноразнотравно-кустарниковыми и можжевеловыми сообществами на выходах гранитных плит и с доминированием *Festuca valesiaca*, *Stipa kirghisorum*, *Cleistogenes squarrosa*, *Carex pediformis* и др. на нарушенных участках. На рисунке 3 приведено распределение TCB и ОСТ в растительном покрове для 17 точек, расположенных на различном удалении от P-1 и на разных элементах ландшафта.



100-2900

ательная скважина ТСВ, Бк/кг () 10-20 <10</p>



Рисунок 3. Распределение ТСВ и ОСТ в растительном покрове объекта «Лазурит»

На основании проведенного лабораторного анализа в районе скважины P-1 объекта «Лазурит» (периметр ~ 300 м) количественные значения удельной активности установлены и для TCB и для OCT. Содержание TCB в среднем варьирует от 6±1 до 81±11 Бк/кг, содержание OCT – от <10 до 37±9 Бк/кг. При этом максимальная концентрация, как видно из рисунка 3, отмечается близ скважины и для TCB достигает 29000±3000 Бк/кг, для OCT – 14000±2000 Бк/кг, что значительно выше уровня вмешательства (УВ) по содержанию <sup>3</sup>Н в питьевой воде (7600 Бк/кг) [18].

Отношение ОСТ/ТСВ составляет 0,8, что значительно меньше значений, приводимых в литературе – 2-3 [19], но сопоставимо с данными, ранее полученными для территории СИП на площадке «Дегелен» – 0,6 [11]. Данный факт указывает на наличие современного источника поступления <sup>3</sup>Н в растения [19], в роли которого, в частности, могут выступать грунтовые воды [4].

Горы Муржик являются областью питания и транзита подземных вод. Проведение подземного ядерного взрыва в скважине P-1 объекта «Лазурит» привело к существенной деформации массива горных пород с образованием зон дробления и зияющих трещин. В результате чего на данном участке значительно увеличилась проницаемость горных пород, что способствовало усилению нисходящей фильтрации и частичному переводу поверхностного водотока в подземный. Атмосферные осадки и подземные воды на участке взрыва по техногенным трещинам поступают в зоны дробления, где происходит их радиоактивное загрязнение. Основным загрязнителем подземных вод в настоящее время является <sup>3</sup>Н [20].

Разность температур на дневной поверхности и на уровне залегания подземных вод способствует образованию тепловой конвекции воздуха, в результате которой тритированная вода в состоянии пара поступает на дневную поверхность, где она сорбируется почвенными частицами и переходит в растения. Причем по концентрации <sup>3</sup>Н в растениях можно косвенно судить не только об уровне загрязнения подземных вод <sup>3</sup>Н, но и о направлении их движения, на что, в свою очередь, указывает наличие количественных значений удельной активности ТСВ в точках понижений в рельефе №№ 56, 57, 59, 60, расположение которых соответствует северо-восточному направлению движения подземных вод, характерному для данной территории [21].

# Заключение

По результатам проведенных исследований установлено, что растительный покров территории в районе объекта «Лазурит» включает 5 основных типов экосистем: экосистемы низкогорий, экосистемы высоких мелкосопочников, экосистемы низких мелкосопочников, экосистемы делювиально-пролювиальных равнин и экосистемы аллювиальных равнин. Анализ лабораторных данных показал, что содержание ОСТ в растительном покрове на исследуемой территории незначительно и в абсолютном большинстве случаев находится ниже предела обнаружения используемого аппаратурно-методического обеспечения. Установленные количественные значения ТСВ и ОСТ в среднем составляют от 6 до 81 Бк/кг и от <10 до 37 Бк/кг, соответственно, и характерны для экосистем низкогорий с максимумом близ приустьевой площадки скважины P-1: TCB – 29000±3000 Бк/кг, ОСТ - 14000±2000 Бк/кг. Отношение ОСТ/ТСВ составляет 0,8, что может указывать на наличие современного источника поступления <sup>3</sup>Н в растения. При этом распределение повышенных значений содержания ТСВ соответствуют направлению движения подземных вод, которое для данной территории характеризуется как северо-восточное. Таким образом, растительный покров объекта «Лазурит» отражает пространственное распределение тритиевого загрязнения и может быть использован как один из индикаторов радиационной обстановки при контроле данной территории.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Республики Казахстан в рамках научного гранта AP14869391 «Исследование перераспределения трития в основных компонентах степных экосистем аридных условий Казахстана».

## ЛИТЕРАТУРА

- Schell, W. R. World distribution of environmental tritium / W. R. Schell, G. Gauzay, W. R. Payne // Physical Behaviour of Radioactive Contaminants in the Atmosphere. / IAEA. – Vienna, 1974. – P. 375.
- Беловодский, Л. Ф. Тритий / Л. Ф. Беловодский, В. К. Гаевой, В. И. Гришмановский. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 247 с.
- Ляхова, О. Н. Тритий как индикатор мест проведения ядерных испытаний / О. Н. Ляхова, С. Н. Лукашенко, Н. В. Ларионова, С. Б. Субботин // Вестник НЯЦ РК. – 2011. – Вып. 3. – С. 125–128.
- Larionova, N. V. Plants as indicators of tritium concentration in ground water at the Semipalatinsk test site / N. V. Larionova, S. N. Lukashenko, O. N. Lyakhova [et al.] // Journal of Environmental Radioactivity. 2017. Vol. 177. P. 218–224. https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2017.06.032.
- Ляхова, О. Н. Оценка уровня концентрации газообразных соединений трития в местах проведения ядерных испытаний на территории семипалатинского испытательного полигона / О. Н. Ляхова, С. Н. Лукашенко, Н. В. Ларионова [и др.] // Радиационная биология. Радиоэкология. 2020. Том 60, № 6. С. 646–657. https://doi.org/10.31857/S086980312006020X.
- Тимонова, Л. В. Исследование содержания трития в почве в местах проведения ядерных испытаний на территории Семипалатинского испытательного полигона / Л. В. Тимонова, О. Н. Ляхова, С. Н. Лукашенко [и др.] // Радиационная биология. Радиоэкология. – 2015. – Т. 55, № 6. – С. 667–672. https://doi.org/10.7868/S0869803115050136.

- Тимонова, Л. В. Тритиевое загрязнение почвы в местах проведения наземных ядерных испытаний на Семипалатинском испытательном полигоне / Л. В. Тимонова, О. Н. Ляхова, А. О. Айдарханов [и др.] // Радиация и риск. – 2020. – Т. 29, № 4. – С. 106–117. https://doi.org/10.21870/0131-3878-2020-29-4-106-117.
- Timonova, L. V. Tritium distribution in soil in the area of "Atomic" lake near the Semipalatinsk test site / L. V. Timonova, O. N. Lyakhova, S. N. Lukashenko [et al.] // Eurasian Soil Science. – 2020. –Vol. 53. – P. 355–361. https://doi.org/10.1134/S1064229320030096.
- Serzhanova, Z. B. Researching of tritium speciation in soils of "Balapan" site / Z. B. Serzhanova, A. K. Aidarkhanova, S. N. Lukashenko [et al.] // J. Environ. Radioact. – 2018. – Vol. 192. – P. 621–627.

https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2018.02.016.

- Polivkina, Ye. N. Assessment of tritium uptake by *Heli-anthus Annuus* culture continuously exposed to HTO at the Semipalatinsk test site / Ye. N. Polivkina, N. V. Larionova, O. N. Lyakhova // Radiation and Risk. 2020. Vol. 29, No. 1. P. 79–89. Bibliogr.: p. 87. https://doi.org/10.21870/0131-3878-2020-29-1-79-89.
- Polivkina, Ye. N. Assessment of the tritium distribution in the vegetation cover in the areas of underground nuclear explosions at the Semipalatinsk test site / Ye. N. Polivkina, N. V. Larionova, S. N. Lukashenko [et al.] // J. Environ. Radioact. – 2021. – Vol. 237. – 8 p. – Bibliogr.: p. 7– 8. https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2021.106705.
- 12. Янкаускас, А.Б. Влияние трития на морфо-анатомическую структуру растений вида тростник обыкновенный (*Phragmites australis*) / А. Б. Янкаускас, Н. В. Ларионова, А. Н. Шатров // Радиация и риск. 2021. Т. 30, № 2. С. 133–145. Библиограф.: с.143. https://doi.org/10.21870/0131-3878-2021-30-2-133-145.
- Krivitskiy, P. Ye. Peculiarities of radioactive soil contamination in places of underground nuclear tests in the Semipalatinsk test site / P. Ye. Krivitskiy, N. V. Larionova, V. N. Monayenko [et al.] // J. Environ. Radioact. 2022. –Vol. 253–254. 7 p. https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2022.106991.
- Инструкция по наземному обследованию радиационной обстановки на загрязненной территории: утв. Межведомственной комиссией по радиационному контролю природной среды при Госкомгидромете СССР. – М., 1989.
- Полевая геоботаника / Акад. наук СССР. Ботан. ин-т им. В. Л. Комарова; под общ. ред. Е. М. Лавренко и А. А. Корчагина. – Москва; Ленинград: Изд-во Акад. наук СССР, 1959–1964. – 5 т.
- Инновационный патент 29721 РК, МПК В01D 3/10, G21F 9/08. Установка для извлечения воды из образцов / Лукашенко С.Н., Ларионова Н.В., Зарембо В.П. // Электронный бюллетень. Астана, 2015. бюл. № 4. – URL: http://kz-patents.com/4-ip29721-ustrojjstvo-dlyaizvlecheni-ya-vody-iz-obrazcov.html.
- 17. Качество воды. Определение объёмной активности трития. Метод подсчёта сцинтилляций в жидкой среде. Международный стандарт ISO 9698:2019. – Астана: «КазИнСт», 2019. – 32 с.
- Гигиенические нормативы к обеспечению радиационной безопасности: утв. приказом Министра здравоохранения Республики Казахстан от 02 августа 2022 г. № КР ДСМ-71.

- Kim, S.B. Determination of the baseline tritium concentrations (HTO, TFWT and OBT) in soil and plants in Ontario, Canada / Kim S.B., Bredlaw M., Rousselle H., Bond M., Stuart M. // J. Environ. Radioact. 2021. Vol. 243(2). 9 p.
- https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2021.106810.
  20. Субботин, С.Б. Выявление путей миграции техногенных радионуклидов за пределы испытательной площадки «Балапан» / С.Б. Субботин, С. Н. Лукашенко, В. В. Романенко [и др.] //Актуальные вопросы радио-экологии Казахстана / Ин-т радиационной безопасности и экологии РГП НЯЦ РК. Павлодар: ТОО «Дом печати», 2011. Вып. 3.: Сб. тр. Национального ядерного центра Республики Казахстан за 2010 г. Т. 2. С. 161–232. Библиогр.: с. 230–231.
- 21. РБП 036 «Развитие атомных и энергетических проектов» подпрограмма 101 «Обеспечение радиационной безопасности на территории Республики Казахстан», мероприятие 1 «Обеспечение безопасности бывшего Семипалатинского испытательного полигона»: отчет НТП за 2017 г. (информац.)/ филиал «Институт радиационной безопасности и экологии» РГП НЯЦ РК; рук. Лукашенко С.Н.; рук. работ Стрильчук Ю.Г. Курчатов, 2017. 95 с. Библиогр.: с. 94–95; 35 назв. Инв. № 0-1246.

# REFERENCES

- Schell, W. R. World distribution of environmental tritium / W. R. Schell, G. Gauzay, W. R. Payne // Physical Behaviour of Radioactive Contaminants in the Atmosphere. / IAEA. – Vienna, 1974. – P. 375.
- Belovodskiy, L. F. Tritiy / L. F. Belovodskiy, V. K. Gaevoy, V. I. Grishmanovskiy. – Moscow: Energoatomizdat, 1985. – 247 p.
- Lyakhova, O. N. Tritiy kak indikator mest provedeniya yadernykh ispytaniy / O. N. Lyakhova, S. N. Lukashenko, N. V. Larionova, S. B. Subbotin // Vestnik NYaTs RK. – 2011. – Issue 3. – P. 125–128.
- Larionova, N. V. Plants as indicators of tritium concentration in ground water at the Semipalatinsk test site / N. V. Larionova, S. N. Lukashenko, O. N. Lyakhova [et al.] // Journal of Environmental Radioactivity. 2017. Vol. 177. P. 218–224. https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2017.06.032.
- Lyakhova, O. N. Otsenka urovnya kontsentratsii gazoobraznykh soedineniy tritiya v mestakh provedeniya yadernykh ispytaniy na territorii semipalatinskogo ispytatel'-nogo poligona / O. N. Lyakhova, S. N. Lukashenko, N. V. Larionova [i dr.] // Radiatsionnaya biologiya. Radioekologiya. 2020. Tom 60, No. 6. P. 646–657. https://doi.org/10.31857/S086980312006020X.
- Timonova, L. V. Issledovanie soderzhaniya tritiya v pochve v mestakh provedeniya yadernykh ispytaniy na territorii Semipalatinskogo ispytatel'nogo poligona / L. V. Timonova, O. N. Lyakhova, S. N. Lukashenko [i dr.] // Radiatsionnaya biologiya. Radioekologiya. – 2015. – T. 55, No. 6. – P. 667–672. https://doi.org/10.7868/S0869803115050136.
- Timonova, L. V. Tritievoe zagryaznenie pochvy v mestakh provedeniya nazemnykh yadernykh ispytaniy na Semipalatinskom ispytatel'nom poligone / L. V. Timonova, O. N. Lyakhova, A. O. Aydarkhanov [i dr.] // Radiatsiya i risk. – 2020. – T. 29, No. 4. – P. 106–117. https://doi.org/10.21870/0131-3878-2020-29-4-106-117.

- Timonova, L. V. Tritium distribution in soil in the area of "Atomic" lake near the Semipalatinsk test site / L. V. Timonova, O. N. Lyakhova, S. N. Lukashenko [et al.] // Eurasian Soil Science. – 2020. –Vol. 53. – P. 355–361. https://doi.org/10.1134/S1064229320030096.
- Serzhanova, Z. B. Researching of tritium speciation in soils of "Balapan" site / Z. B. Serzhanova, A. K. Aidarkhanova, S. N. Lukashenko [et al.] // J. Environ. Radioact. - 2018. - Vol. 192. - P. 621–627. https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2018.02.016.
- Polivkina, Ye. N. Assessment of tritium uptake by Helianthus Annuus culture continuously exposed to HTO at the Semipalatinsk test site / Ye. N. Polivkina, N. V. Larionova, O. N. Lyakhova // Radiation and Risk. – 2020. – Vol. 29, No. 1. – P. 79–89. – Bibliogr.: p. 87. https://doi.org/10.21870/0131-3878-2020-29-1-79-89.
- Polivkina, Ye. N. Assessment of the tritium distribution in the vegetation cover in the areas of underground nuclear explosions at the Semipalatinsk test site / Ye. N. Polivkina, N. V. Larionova, S. N. Lukashenko [et al.] // J. Environ. Radioact. – 2021. – Vol. 237. – 8 p. – Bibliogr.: p. 7– 8. https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2021.106705.
- Yankauskas, A.B. Vliyanie tritiya na morfo-anatomicheskuyu strukturu rasteniy vida trostnik obyknovennyy (Phragmites australis) / A. B. Yankauskas, N. V. Larionova, A. N. Shatrov // Radiatsiya i risk. – 2021. – T. 30, No. 2. – P. 133–145. – Bibliograf.: p. 143. https://doi.org/10.21870/0131-3878-2021-30-2-133-145.
- 13. Krivitskiy, P. Ye. Peculiarities of radioactive soil contamination in places of underground nuclear tests in the Semipalatinsk test site / P. Ye. Krivitskiy, N. V. Larionova, V. N. Monayenko [et al.] // J. Environ. Radioact. 2022. –Vol. 253–254. 7 p.

https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2022.106991.

- Instruktsiya po nazemnomu obsledovaniyu radiatsionnoy obstanovki na zagryaznennoy territorii: utv. Mezhvedomstvennoy komissiey po radiatsionnomu kontrolyu prirodnoy sredy pri Goskomgidromete SSSR. – Moscow, 1989.
- Polevaya geobotanika / Akad. nauk SSSR. Botan. in-t im. V. L. Komarova; pod obshch. red. E. M. Lavrenko i A. A.

Korchagina. – Moscow; Leningrad: Izd-vo Akad. nauk SSSR, 1959–1964. – 5 t.

- 16. Innovatsionnyy patent 29721 RK, MPK B01D 3/10, G21F 9/08. Ustanovka dlya izvlecheniya vody iz obraztsov / Lukashenko S.N., Larionova N.V., Zarembo V.P. // Elektronnyy byulleten'. Astana, 2015. byul. No. 4. – URL: http://kz-patents.com/4-ip29721-ustrojjstvo-dlyaizvlecheni-ya-vody-iz-obrazcov.html.
- Kachestvo vody. Opredelenie ob"emnoy aktivnosti tritiya. Metod podscheta stsintillyatsiy v zhidkoy srede. Mezhdunarodnyy standart ISO 9698:2019. – Astana: «KazInSt», 2019. – 32 p.
- Gigienicheskie normativy k obespecheniyu radiatsionnoy bezopasnosti: utv. prikazom Ministra zdravookhraneniya Respubliki Kazakhstan ot 02 avgusta 2022 g. No. KR DSM-71.
- Kim, S.B. Determination of the baseline tritium concentrations (HTO, TFWT and OBT) in soil and plants in Ontario, Canada / Kim S.B., Bredlaw M., Rousselle H., Bond M., Stuart M. // J. Environ. Radioact. – 2021. – Vol. 243(2). – 9 p. https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2021.106810.
- Subbotin, S.B. Vyyavlenie putey migratsii tekhnogennykh radionuklidov za predely ispytatel'noy ploshchadki «Balapan» / S. B. Subbotin, S. N. Lukashenko, V. V. Romanenko [i dr.] //Aktual'nye voprosy radioekologii Kazakhstana / In-t radiatsionnoy bezopasnosti i ekologii RGP NYaTs RK. – Pavlodar: TOO «Dom pechati», 2011. – Issue 3.: Sb. tr. Natsional'nogo yadernogo tsentra Respubliki Kazakhstan za 2010 g. – T. 2. – P. 161–232. – Bibliogr.: p. 230–231.
- 21. RBP 036 «Razvitie atomnykh i energeticheskikh proektov» podprogramma 101 «Obespechenie radiatsionnoy bezopasnosti na territorii Respubliki Kazakhstan», meropriyatie 1 «Obespechenie bezopasnosti byvshego Semipalatinskogo ispytatel'nogo poligona»: otchet NTP za 2017 g. (informats.)/ filial «Institut radiatsionnoy bezopasnosti i ekologii» RGP NYaTs RK; ruk. Lukashenko S.N.; ruk. rabot Stril'chuk Yu.G. – Kurchatov, 2017. – 95 p. – Bibliogr.: p. 94–95; 35 nazv. – Inv. No. o-1246.

# СЕМЕЙ СЫНАҚ ПОЛИГОНЫНЫҢ «ЛАЗУРИТ» ОБЪЕКТІСІНДЕГІ ӨСІМДІК ЖАМЫЛҒЫСЫН ЖӘНЕ ОНДАҒЫ ТРИТИЙ ҚҰРАМЫН ЗЕРТТЕУ

<u>Н.В. Ларионова<sup>1</sup></u>, П.Е. Кривицкий<sup>1</sup>, Б.М. Султанова<sup>2</sup>, В.В. Полевик<sup>3</sup>, Л.В. Тимонова<sup>1</sup>, С.Б. Субботин<sup>1</sup>, Л.Ф. Субботина<sup>1</sup>, М.Т. Абишева<sup>1</sup>, В.Н. Монаенко<sup>1</sup>, А.В. Топорова<sup>1</sup>, А.О. Айдарханов<sup>1</sup>

КР ¥ЯО РМК «Радиациялық қауіпсіздік және экология институты» филиалы, Курчатов, Қазақстан
 Ботаника және фитоинтродукция институты, Алматы, Қазақстан
 «Семей қаласының Шәкәрім атындағы университеті» КЕ АҚ, Семей, Қазақстан

Мақалада «Лазурит» объектісінің өсімдік жамылғысының сипаттамасы, оның ішінде тритий радионуклидінің (<sup>3</sup>H) құрамы: өсімдіктердің бос суында (TCB) және олардың органикалық құрамдас бөлігі (ОСТ) келтірілген. Экожүйелердің 5 негізгі түрі анықталды: төмен, биік ұсақ шоқылар, төмен ұсақ шоқылар, делювиалды-пролювиалды және аллювиалды жазықтар. Зерттелетін аумақтағы өсімдік жамылғысындағы ОСТ құрамы болмашы ғана және абсолютті көп жағдайда қолданылатын аппаратуралық-әдістемелік қамтамасыз етуді анықтау шегінен төмен екендігі анықталды. TCB және ОСТ белгіленген мөлшерлік мәндері орташа есеппен 6-дан 81 Бк/кг-ға дейін және <10-нан 37 Бк/кг-ға дейін, сәйкесінше, Р-1 ұңғымасының сағалық алаңына жақын максимум (TCB – 29000±3000 Бк/кг, ОСТ – 14000±2000 Бк/кг) мәнді құрады. Бұл ретте ОСТ/TCB (0,8) қатынасы өсімдіктерге <sup>3</sup>H түсудің қазіргі уақыттағы көзінің болуын көрсетеді.

**Түйін сөздер:** ССП, өсімдік жамылғысы, тритий (<sup>3</sup>H).

## THE STUDY OF THE PLANT COVER AND THE CONTENT OF TRITIUM AT 'LAZURIT' OBJECT OF THE SEMIPALATINSK TEST SITE

N.V. Larionova<sup>1)</sup>, P.Ye. Krivitskiy<sup>1)</sup>, B.M. Sultanova<sup>2)</sup>, V.V. Polevik<sup>3)</sup>, L.V. Timonova<sup>1)</sup>, S.B. Subbotin<sup>1)</sup>, L.F. Subbotina<sup>1)</sup>, M.T. Abisheva<sup>1)</sup>, V.N. Monayenko<sup>1)</sup>, A.V. Toporova<sup>1)</sup>, A.O. Aidarkhanov<sup>1)</sup>

RSE NNC RK Branch "Institute of Radiation Safety and Ecology", Kurchatov, Kazakhstan
 <sup>2)</sup> Institute of Botany and Phytointroduction, Almaty, Kazakhstan
 <sup>3)</sup> "Semey University named after Shakarim" NP JSC, Semey, Kazakhstan

The paper presents the characteristics of the plant cover at the 'Lazurit' object including the content of tritium ( $^{3}$ H): tissue free water tritium (TFWT) and organically bound tritium (OBT). There were 5 major ecosystem types noted: ecosystems of low-hill terrain, high and low hummocks, deluvial-proluvial and alluvial plains. The content of OBT in the plant cover of the study area was found to be insignificant and, in most cases, below the detection limit of the methodological instrumentation in use. Quantitative values reported for TFWT and OBT average 6 to 81 Bq/kg and <10 to 37 Bq/kg, respectively, with a maximum near the mouth site of borehole R-1 (TFWT – 29,000±3,000 Bq/kg, OBT – 14,000±2,000 Bq/kg). At the same time, the ratio of OBT/ TFWT (0.8) points to the presence of a recent source of <sup>3</sup>H entry into plants.

*Keywords: STS*, *plant cover*, *tritium*  $(^{3}H)$ .

## <u>https://doi.org/10.52676/1729-7885-2023-1-97-103</u> УДК 556.114.679

# ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА ЖИДКОСТНОЙ СЦИНТИЛЛЯЦИИ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ СУММАРНОЙ АЛЬФА-, БЕТА-АКТИВНОСТИ В ВОДЕ

## К.Т. Мустафина, Ф.Ф. Жамалдинов, Е.В. Романенко, Е.З. Шакенов, А.И. Меркель, С.Е. Сальменбаев

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

E-mail для контактов: zhamaldinov@nnc.kz

Приведены результаты исследований по применению метода определения суммарной альфа-, бета-активности в воде с использованием жидкостного сцинтилляционного счетчика (ЖСС) Quantulus 1220. Изучены и выполнены основные процедуры подготовки и спектрометрического измерения водных образцов. Определены эффективность регистрации альфа-, бета-частиц в зависимости от гашения и оптимальный параметр разделения альфа-, бета-излучения для применяемой методики. Отработка и испытания методики проводилась на модельных растворах с различной концентрацией и составом альфа-, бета-излучателей, а также путем участия в межлабораторных сличениях. Результаты показали, что использование ЖСС позволяет достаточно быстро и точно проводить оценку суммарной альфа- и бета-активности в воде на уровне ниже регламентируемых пределов без применения трудоемкой подготовки проб.

**Ключевые слова:** радионуклиды, радиоактивность воды, суммарная альфа-, бета-активность, жидко-сцинтилляционный счет, альфа/бета разделение.

#### Введение

Радионуклиды, присутствующие в питьевой воде, могут представлять опасность для здоровья человека. Как правило, эта опасность обычно несравнима с рисками, связанными с микроорганизмами и химическими веществами в воде, так как дозы облучения, получаемые при потреблении питьевой воды содержащей природные радионуклиды, намного ниже доз, получаемых от других источников радиации. Однако этот риск необходимо учитывать, так как основы защиты человека от внутреннего облучения строятся на предположении, что любое радиационное воздействие, даже в малых дозах, сопряжено с определенным уровнем опасности [1].

В питьевой воде могут содержаться в различных концентрациях природные альфа- (<sup>238</sup>U, <sup>234</sup>U, <sup>232</sup>Th, <sup>226</sup>Ra и <sup>210</sup>Po) и бета-излучатели (<sup>40</sup>K, <sup>228</sup>Ra и <sup>210</sup>Pb), а также искусственные радионуклиды (<sup>241</sup>Am, <sup>90</sup>Sr) [2]. Рекомендации Всемирной Организации Здравоохранения (ВОЗ) указывают, что наиболее практичным подходом в оценке безопасности питьевой воды является использование процедуры скрининга, в рамках которой первым этапом определяется суммарный уровень альфа- и бета-радиоактивности, без учета конкретных радионуклидов. Скрининговые уровни для суммарной альфа- и бета-радиоактивности питьевой воды, согласно данным рекомендациям, составляют 0,5 Бк/л и 1 Бк/л, соответственно [2, 3]. При значениях суммарной радиоактивности ниже указанных величин, дальнейшие действия не предусматриваются.

В Казахстане, согласно нормативной документации, данные показатели составляют 0,2 Бк/л для альфа- и 1,0 Бк/л для бета-радиоактивности [4]. При этом для измерения суммарной активности, как правило, используются радиометры с твердотельным счетчиком (например, радиометр УМФ). Но у подобных приборов есть существенные недостатки, такие как: необходимость контроля за радиационным фоном в лабораторном помещении, обусловленного радоном (Rn) и его дочерними продуктами распада при проведении анализа; а также относительно большие объемы проб воды, необходимые для достижения требуемых пределов обнаружения, что неизбежно влечет за собой увеличение времени на подготовку проб.

В последние годы в мировом сообществе для измерения альфа- и бета-излучателей в образцах окружающей среды широко применяют спектрометрию жидкостного сцинтилляционного счета (ЖСС) [5, 6]. Особенно использование этого метода предпочтительно, если концентрации радионуклидов очень малы. Пределы обнаружения обеспечиваемые ЖСС гораздо ниже в сравнении с другими методами измерений благодаря низким фоновым характеристикам приборов. Более того, применение ЖСС имеет такие несомненные преимущества, как высокая эффективность регистрации частиц, простота подготовки проб к измерению. Однако в Казахстане, из-за ограниченности подобного спектрометрического оборудования, данный метод не нашел практического применения. В этой связи проведение научно-исследовательской работы по использованию метода ЖСС для измерения суммарной альфа-, бета-радиоактивности имеет особую актуальность и практическую значимость.

#### Материалы и методы

#### Описание метода

Определение суммарной альфа-, бета-активности в воде с помощью ЖСС основано на использовании схемы анализа формы импульса (PSA) в данных приборах. Анализ формы импульса позволяет установить различия между альфа- и бета-импульсами, генерируемыми в жидком сцинтилляционном коктейле, путем сравнения площади хвоста импульса, производимого в фотоумножительных устройствах, с общей площадью импульса. Импульс, обусловленный регистрацией альфа-частицы, длиннее, чем от бетачастицы (рисунок 1).



Рисунок І. Различие импульсов, обусловленных регистрацией альфа- и бета-частиц [7]

На параметр разделения частиц с помощью жидкостной сцинтилляции влияет множество факторов: гашение (цветное или химическое) образца, сцинтилляционный коктейль, радионуклид, а также используемый сцинтилляционный счетчик. Таким образом, оптимальная настройка параметра PSA должна определяться специально для используемого прибора, с учетом используемого типа флакона и общего химического состава счетного образца [8, 9].

Эффективность регистрации частиц зависит от количества растворенных в воде минералов, которые поглощают некоторое количество света, генерируемого в сцинтилляторе. Это явление принято называть «гашением». Выделяют также «цветовое» гашение, обусловленное окрашиванием счетного образца после предварительной или радиохимической подготовки.

На корректность подсчета как для альфа-, так и для бета-компонентов влияет энергия излучателя, используемого для выбора оптимального коэффициента калибровки. Наилучшие результаты достигаются в том случае, когда радионуклидный состав анализируемого образца известен и калибровочный радионуклид выбирается так, чтобы максимально точно соответствовать энергии радионуклида образца[10, 11].

В данной работе для измерения суммарной альфа, , бета-активности природных вод применялся низкофоновый жидкостной сцинтилляционный спектрометр Quantulus 1220 производства компании «PerkinElmer» (США). Подготовленные счетные образцы помещались в кварцевые измерительные флаконы. В качестве сцинтилляционного коктейля для счетных образцов применялся Ultima Gold LLT, имеющий наилучшие фоновые характеристики и высокую устойчивость к разделению фаз.

# Процедура подготовки и измерения счетных образцов

Из анализируемой пробы воды отбиралась аликвота объемом от 50 до 200 мл (в зависимости от степени минерализации исходной пробы). Выполнялось подкисление концентрированной HNO<sub>3</sub> до pH ≤ 2 и vпаривание до объема ~5 мл. Далее образе⊔ переносился в кварцевый измерительный флакон и упаривался до влажных солей. Полученный остаток разбавлялся 5 мл 0,1 М HNO<sub>3</sub> и подогревался до растворения солей. На последнем этапе подготовки добавляпось 15 мл сцинтилляционного коктейля Ultima Gold LLT и осуществлялось тщательное перемешивание. Измерение счетных образцов выполнялось на низкофоновом жидкостном сцинтилляционном спектрометре Quantulus 1220 в течение 60 мин.

## Определение оптимального параметра разделения альфа-, бета-частиц

Для настройки режима разделения альфа-, бетачастиц подготавливались эталонные растворы излучателей: <sup>90</sup>Sr – чистого бета-излучателя и <sup>241</sup>Am – чистого альфа-излучателя. В счетные флаконы добавлялось 5 мл раствора <sup>90</sup>Sr и <sup>241</sup>Am (таблица 1) и осуществлялось смешивание с 15 мл сцинтилляционного коктейля Ultima Gold LLT.

Таблица 1. Активность альфа-бета излучателей в калибровочных счетных образцах

Образец	Бета-активность, Бк	Альфа-активность, Бк
<sup>241</sup> Am	0	180
90Sr-90Y	980	0

Подготовленные калибровочные счетные образцы измерялись в течение 20 мин, чтобы обеспечить стандартную неопределенность подсчета не менее 1 % (рисунок 2). Измерение проводилось с различными установленными настройками разделения частиц. Параметр PSA, безразмерная величина, варьировался в диапазоне от 50 до 120. Ошибки классификации альфа- как бета-частицы ( $X_a$ ), и бета- как альфа-частицы ( $X_b$ ) оценивались с помощью выражений:

$$X_{a} = \frac{B_{0}}{(A_{0} + B_{0})},$$
(1)

$$X_{b} = \frac{A_{0}}{(A_{0} + B_{0})}, \qquad (2)$$

где  $X_a$  – ошибка определения альфа-частицы как бета-частицы;  $X_b$  – ошибка определения бета-частицы как альфа-частицы;  $B_0$  – скорость счета бета-частиц в анализаторе;  $A_0$  – скорость счета альфа-частиц в анализаторе.

Построенные зависимости уровня PSA от ошибки определения альфа- и бета-частиц позволили определить оптимальный параметр разделения частиц. В нашем случае это значение составило – 45 (рисунок 3).

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА ЖИДКОСТНОЙ СЦИНТИЛЛЯЦИИ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ СУММАРНОЙ АЛЬФА-, БЕТА-АКТИВНОСТИ В ВОДЕ



Рисунок 2. Спектр жидкостного сцинтилляционного измерения калибровочных счетных образцов при оптимальном параметре разделения альфа-, бета-частиц



Рисунок 3. Графическое определение оптимального параметра альфа-, бета-разделения PSA. Оптимальное значение PSA находится на пересечении кривых ошибок определения альфа- и бета-частиц и составляет 45

Таблица 2. Состав счетных о	образцов для калибровки 🕽	КСС по эффективности регистрации
-----------------------------	---------------------------	----------------------------------

№ образца	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Feel we	1/20*)							насыщ. раствор FeCl <sub>3</sub>	
Fecis, MJI	-	0,1	0,2	0,4	0,8	1,6	3,2	0,32	0,64
0,1 М HNO3, мл	5	4,9	4,8	4,6	4,2	3,4	1,8	4,68	4,36
Ultima Gold-сцинтиллятор, мл	15	15	15	15	15	15	15	15	15

<sup>\*)</sup> 1 мл насыщенного раствора FeCl<sub>3</sub> разбавили в 20 раз

# Калибровка ЖСС по эффективности регистрации частиц

Для измерения суммарной альфа- и бета-активности было проведено определение эффективности регистрации альфа-частиц в альфа-области, альфа-частиц в бета-области, бета-частиц в бета-области и бета-частиц в альфа-области в зависимости от гашения. Оценивалось влияние «цветового» гашения на изменение эффективности регистрации. С этой целью в приготовленные счетные образцы из чистых альфа- и бета-излучателей (<sup>241</sup>Am и <sup>90</sup>Sr активностью по 200 Бк) добавлялось различное количество гасителя FeCl<sub>3</sub> (таблица 2) и выполнялось измерение.

Построенные кривые эффективности регистрации альфа- и бета-частиц представлены на рисунках 4 и 5.



Рисунок 4. Зависимость эффективности регистрации альфа-излучения є от параметра гашения SQP в счетном образце: а) в области регистрации альфа-частиц; б) в области регистрации бета-частиц

## Контрольные измерения модельных растворов

Отработка методики измерений выполнялась на модельных растворах. В 5 образцов подкисленной дистиллированной воды, объемом 200 мл, вносилось различное количество <sup>90</sup>Sr и <sup>241</sup>Am. Подготовка и измерение счетных образцов осуществлялись согласно освоенным процедурам радиометрического анализа. Результаты контрольных измерений представлены в таблице 3.



Рисунок 5. Зависимость эффективности регистрации бета-излучения є от параметра гашения SQP в счетном образце: а) в области регистрации бета-частиц; б) в области регистрации альфа-частиц

Максимальная ошибка при определении альфаактивности в образцах составила 24%, бета-активности – 22%. Результаты контрольных измерений показывают на возможность определения удельной альфа- и бета-активности в питьевой воде на уровне 0,05 Бк/л и 0,7 Бк/л, соответственно, что гораздо ниже регламентируемых значений.

050000	Активность	<sup>241</sup> Am, Бк/л	Васкожношие %	Активность 9	Васхожношио %	
Образец	Фактическое	Измеренное	гасхождение, ло	Фактическое	Измеренное	Гасхождение, //
1	0,50±0,02	0,47±0,05	-6	7,3±0,4	6,4±0,6	-11
2	0,40±0,02	0,38±0,04	-5	5,8±0,3	4,5±0,5	-22
3	0,25±0,01	0,31±0,03	24	3,6±0,2	3,1±0,3	-15
4	0,10±0,01	0,12±0,02	20	1,45±0,07	1,34±0,13	-8
5	0,050±0,003	0,055±0,014	10	0,72±0,04	0,74±0,11	3

Таблица 3. Результаты измерений модельных растворов

Образец	Анализ	Аттестованное среднее значение, Бк/кг	Аттестованное стандартное отклонение, Бк/кг	Измеренная активность, Бк/кг	z	Оценка
1	суммарная альфа-активность	23,98	7,78	34±5	1,29	пройден
1	суммарная бета-активность	124,75	29,46	120±18	0,16	пройден
2	суммарная альфа-активность	12,72	3,73	16,5±2,5	1,01	пройден
2	суммарная бета-активность	28,94	6,35	28±4	0,15	пройден
3	суммарная альфа-активность	8,93	3,04	10,6±1,6	0,55	пройден
3	суммарная бета-активность	27,63	6,78	27±4	0,09	пройден

Таблица 4. Результаты межлабораторных испытаний IAEA-TERC-2022-02

#### Межлабораторное сличение

Испытания отработанного метода определения суммарной альфа-бета активности проводились путем участия в ежегодном межлабораторном квалифитесте **IAEA-TERC-2022-02** кашионном сети ALMERA (Analytical Laboratories for the Measurement of Environmental Radioactivity - Аналитические лаборатории по измерению радиоактивности окружающей среды) Деятельность данной лабораторной сети, созданной МАГАТЭ, направлена для внешнего контроля качества измерений, а также повышения квалификации и аналитических возможностей лабораторий-участниц с целью обеспечения надежного и своевременного анализа проб окружающей среды в случае случайного или преднамеренного выброса радиоактивности [12].

В квалификационном тесте в 2022 году участвовало 97 лабораторий из 55 стран. Испытания включали в себя исследование 3 водных образцов на анализ суммарного содержания альфа- и бета-излучающих радионуклидов любым подходящим для участников методом. Образцы для лабораторных испытаний были отобраны в г. Зайберсдорф, Австрия и подготовлены путем внесения в необработанную воду известного количества стандартного раствора с содержанием смеси аттестованных радионуклидов. Для стабильности образцов растворы были подкислены до pH ≤ 2 (~0,05M HNO<sub>3</sub>). Объем каждого образца составлял 500 мл. Целевые значения содержания суммарной альфа-, бета-активности в водных образцах определены организаторами испытаний статистическим методом из выборки предварительных аттестационных измерений и оглашены участникам после сбора всех результатов.

Для оценки качества анализа в испытании использовался параметр Z-Score, который рассчитывался согласно выражению:

$$z = \frac{A_{u_{3M}} - A_{u_{e_1}}}{rob \ sd},\tag{3}$$

где:  $A_{uзм}$  – активность в образце, предоставленная участником испытания;  $A_{uen}$  – целевое (аттестованное) значение активности в образце; *rob sd* – аттестованное (робастное) стандартное отклонение значения целевой активности.

Квалификационный тест считался пройденным в случае, если параметр Z-Score был меньше 2; прова-

лен если больше 3. Значение Z-Score от 2 до 3 указывало на необходимость дополнительной проверки используемого метода измерений [13].

## Результаты и их обсуждение

Определение суммарной активности предоставленных водных образцов выполнялось с учетом оптимальных параметров спектрометрических измерений (поправку на гашение счетного образца, параметра разделения частиц) на Quantulus 1220. Результаты квалификационного теста измерения приведены в таблице 4.

Измеренная суммарная альфа-, бета-активность для каждого водного образца вошла в диапазон целевых значений и квалификационный тест был успешно пройден. Рассматривая измерение суммарной бета-активности образцов, где значение параметра Z составило гораздо меньше 1, можно сделать вывод об отличной прецизионности анализа. Касательно оценки содержания альфа-активности наблюдается завышение фактических значений, в отдельных случаях оно достигает 42%. Это возможно объяснить тем, что радионуклидный состав альфа- и бета-излучателей испытуемого образца сильно отличался от того, что использовался для калибровочных измерений при постановке методики. Более того, метод измерения суммарной активности альфа- и бета-излучателей является радиометрическим и обусловлен значительной неопределенностью, что подтверждается большим диапазоном допустимых значений данного теста. Не случайно данный метод используется только для первичной скрининговой оценки радиационной опасности: нецелесообразно для каждого измерения готовить свой калибровочный стандарт, содержание суммарной активности излучателей счетных образцов меняется с течением времени и др.

#### Заключение

В данной работе рассмотрено применение метода ЖСС для измерения суммарной альфа-бета-активности в воде. Выполнены исследования по выбору оптимального параметра разделения альфа- и бета-частиц для ЖСС, изменения эффективности регистрации от цветового гашения счетного образца.

Отработка процедур подготовки и спектрометрических измерений проводилась на модельных растворах с известным содержанием альфа-, бета-излучателей. Максимальная ошибка при контрольных измерениях растворов, с известным добавлением  $^{90}\mathrm{Sr}$  и  $^{241}\mathrm{Am},$  составила 24% для альфа- и 22% для бета-активности.

Испытания применяемой методики осуществлены путем успешного прохождения межлабораторного квалификационного теста IAEA-TERC-2022-02. Во всех случаях результаты измерений вошли в диапазон целевых значений суммарной альфа-, бета-активности.

Данная методика может эффективно применяться для радиоэкологического анализа воды в Казахстане органами санитарно-эпидемиологического благополучия населения, а также научными и исследовательскими центрами, ведущими свою деятельность в области радиоэкологии и экологического мониторинга.

Данные исследования финансировались Министерством энергетики Республики Казахстан в рамках научно-технической программы «Развитие атомной энергетики в Республике Казахстан» (ИРН – BR09158470).

## Литература / References

- 1. D. Amrani, D.E. Cherouati, Health effects from radon-222 in drinking water in Algiers // Journal of Radiological Protection. 1999. 19 (3). P. 275–279.
- 2. WHO Guidelines for drinking water quality (3rd ed.): World Health Organisation, Geneva. – 2011.
- UNSCEAR, United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation (UNSCEAR): Sources and effects of ionising radiation, United Nations, New York. – 2000.
- Гигиенические нормативы к обеспечению радиационной безопасности, утвержденные приказом Минист-

ром здравоохранения Республики Казахстан от 2 августа 2022 года № ҚР ДСМ-71. [Gigienicheskie normativy k obespecheniyu radiatsionnoy bezopasnosti, utverzhdennye prikazom Ministrom zdravookhraneniya Respubliki Kazakhstan ot 2 avgusta 2022 goda No. KR DSM-71.]

- Jobbágy V., Wätjen U., Meresova J. Current status of gross alpha/beta activity analysis in water samples: a short overview of methods // Journal of radioanalytical and nuclear chemistry. – 2010. – T. 286. – No. 2. – P. 393–399.
- Hou X. Liquid scintillation counting for determination of radionuclides in environmental and nuclear application // Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry. – 2018. – T. 318. – No. 3. – P. 1597-1628.
- 7. Alpha-Beta Discrimination. Perkin Elmer official web site URL: https://www.perkinelmer.com/lab-products-andservices/application-support-knowledgebase/radiometric/ alpha-beta.html
- Stojković I. et al. Radionuclide, scintillation cocktail and chemical/color quench influence on discriminator setting in gross alpha/beta measurements by LSC // Journal of Environmental Radioactivity. – 2015. – T. 144. – P. 41–46.
- Hogg A. G., Cook G. T. Liquid scintillation counting (LSC) — Past, present, and future // Radiocarbon. – 2022. – T. 64. – No. 3. – P. 541–554.
- L'Annunziata M. F. et al. Liquid scintillation analysis: principles and practice //Handbook of radioactivity analysis. – Academic press. – 2020. – P. 575–801.
- Stojković I. et al. Methodology of tritium determination in aqueous samples by Liquid Scintillation Counting techniques // Tritium-Advances in research and applications, ed.: Janković, MM, New York: NOVA Science Publishers. – 2018. – P. 99–156
- 12. https://nucleus.iaea.org/sites/ReferenceMaterials/Pages/ ALMERA.aspx
- 13. ISO 13528:2015 Statistical methods for use in proficiency testing by interlaboratory comparison.

## СУДАҒЫ ЖАЛПЫ АЛЬФА, БЕТА БЕЛСЕНДІЛІГІН АНЫҚТАУ ҮШІН СҰЙЫҚ СЦИНТИЛЛЯЦИЯ ӘДІСІН ҚОЛДАНУ

## К.Т. Мустафина, Ф.Ф. Жамалдинов, Е.В. Романенко, Е.З. Шакенов, А.И. Меркель, С.Е. Сальменбаев

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

Quantulus 1220 сұйық сцинтилляциялық есептегішін (ССЕ) пайдалана отырып, судағы жиынтық альфа-, бетабелсенділікті анықтау әдісін қолдану бойынша зерттеулер нәтижелері келтірілген. Су үлгілерін дайындау мен спектрометриялық өлшеудің негізгі рәсімдері зерделеніп, орындалды. Альфа-, бета-бөлшектерді сөндіруге байланысты тіркеудің тиімділігі және қолданылатын әдіс үшін альфа-, бета-сәулеленуді бөлудің оңтайлы параметрі анықталды. Әдістемені пысықтау және валидациялау альфа-, бета-сәуле шығарғыштардың әртүрлі шоғырлануы мен құрамы бар модельдік ерітінділерде, сондай-ақ зертханааралық салыстыруларға қатысу арқылы жүргізілді. Нәтижелер ССЕ пайдалану сынамаларды көп уақытты қажет ететін дайындауды қолданбай, реттелетін шектерден төмен деңгейде судағы жиынтық альфа- және бета-белсенділікті тез және дәл бағалауға мүмкіндік беретінін көрсетті.

**Түйін сөздер:** радионуклидтер, судың радиоактивтілігі, жиынтық альфа, бета белсенділігі, сұйық сцинтилляциялық балл, альфа / бета бөлу

# APPLICATION OF LIQUID SCINTILLATION METHOD FOR MEASURING THE GROSS ALPHA-, BETA-ACTIVITY IN WATER

# K.T. Mustafina, F.F. Zhamaldinov, Ye.V. Romanenko, Ye.Z. Shakenov, A.I. Merkel, S.Ye. Salmenbayev

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

The results of research on the application of the method of measurement of gross alpha-, beta-activity in water using the liquid scintillation counter (LSC) Quantulus 1220 are presented. Basic procedures of preparation and spectrometric measurement of aqueous samples were studied and performed. The detection efficiency of alpha-, beta-particles depending on quenching and the optimum alpha-, beta-radiation separation parameter for the method used were determined. Testing and validation of the technique was carried out on model solutions with different concentrations and composition of alpha- and beta-emitters, as well as by participating in interlaboratory comparisons. The results demonstrated that the use of LSS allows for a sufficiently fast and accurate estimation of the gross alpha- and beta-activity in water below the regulated limits without the use of labor-intensive sample preparation.

**Keywords:** radionuclides, radioactivity of water, gross alpha-, beta-activity, liquid scintillation counting, alpha/beta separation.

# СПИСОК АВТОРОВ

Kambarov Ye.Ye., 25 Kussainov A.Ye., 25 Rutkowska-Gorczyca M., 25 Uazyrkhanova G.K., 25 Абишева М.Т., 88 Азбергенова А.Б., 40 Айдарханов А.О., 55, 88 Актаев М.Р., 55 Баделгажы Е.Б., 15 Беденко С.В., 83 Боргеков Д.Б., 69 Ермаков В.А., 40 Ермоленко М.В., 48 Жамалдинов Ф.Ф., 97 Журерова Л.Г., 4 Ильиных С.А., 40 Иркимбеков Р.А., 83 Исламов Р.С., 40

Кайканов М.И., 77 Капсалямов Б.А., 15 Козловский А.Л., 69 Кривицкий П.Е., 88 Ларионова Н.В., 88 Меркель А.И., 97 Монаенко В.Н., 88 Муктанова Н., 4 Мустафина К.Т., 97 Наурузбаев Д.К., 77 Наурызбаев Р.Ж., 40 Нургалиев Д.Н., 48 Полевик В.В., 88 Попов Ю.А., 83 Прозорова И.В., 83 Рахадилов Б.К., 4 Романенко Е.В., 55, 97 Рябенко П.В., 61

Сабитова Р.Р., 83 Сальменбаев С.Е., 97 Сатыбалдинова А.Е., 48 Соколова И.Н., 61 Степанова О.А., 48 Субботин С.Б., 55, 88 Субботина Л.Ф., 88 Султанова Б.М., 88 Супрунов В.И., 55 Сысалетин А.В., 40 Тимонова Л.В., 88 Тихонов А.В., 77 Топорова А.В., 55, 88 Тусупова Ж.Б., 15 Хасенов М.У., 77 Шакенов Е.З., 97

## 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 A4 (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 (Заголовок 1, 2...) только для названия статьи и заголовков подразделов, и не используйте их для обычного текста, таблиц и подрисуночных 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 подрисуночных 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.tiff). 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 версии статья должна быть в конце подписана авторами.

#### К статье прилагаются следующие документы:

- 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 (<u>https://journals.nnc.kz/jour/about/submissions</u>).

Статьи, оформление которых не соответствует указанным требованиям, к публикации не допускаются.

# ОБРАЗЕЦ

## Название статьи (на русском языке)

Таблица	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.фм.н.	+69992223366	my_mail@google.com	1	

Таблица 2. Орга	<b>низации</b> (на ј	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	Таблица 1. Авторы (на казахском языке)							
Мақала авторының реттік нөмірі	Teri	Толық аты	Әкесінің толық аты (болса)	Лауазымы	Ғылыми дәрежесі	Телефоны (жақшасыз, бос орынсыз және дефиссіз)	Электрондық поштасы	Автор ұйымдарының нөмірлері (2-кестеден)
1	Иванов	Иван	Иванович	доцент	PhD	+57771114455	my_mail@mail.ru	1, 2
2	Петров	Петр	Петрович	зертхана меңгерушісі	фм.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, Satpayev 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: 071100, Казахстан, г. Курчатов, ул. Бейбіт атом, 2Б https://journals.nnc.kz/jour

© Редакция журнала «Вестник НЯЦ РК», 2023

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





